Thèse de Doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie

Spécialité :
**Acoustique musicale**

Sujet de thèse :

# Mécanismes laryngés et voyelles en voix chantée

*Dynamique vocale, phonétogrammes de paramètres glottiques et spectraux, transitions de mécanismes.*

Présentée par : **Sylvain Lamesch**
pour obtenir le titre de Docteur de l'Université Pierre et Marie Curie

Dirigée par M. Jean-Dominique Polack, professeur (UPMC)

soutenue le 18 janvier 2010 devant le jury composé de :

| | | | |
|---|---|---|---|
| Mme | Michèle Castellengo | Directrice de recherche (CNRS) | Co-directrice de thèse |
| M. | Boris Doval | Maître de Conférences (UPMC) | Directeur de thèse |
| M. | Jean-Sylvain Liénard | Directeur de recherche (CNRS) | Rapporteur |
| M. | Sten Ternström | Professeur (KTH, Stockholm) | Rapporteur |
| Mme | Nathalie Henrich | Chargée de Recherche (CNRS) | Examinatrice |
| M. | Bernard Roubeau | Orthophoniste, docteur ès sciences | Examinateur |
| M. | Jean-Luc Zarader | Professeur (UPMC) | Examinateur |
| M. | Robert Expert | Chanteur, professeur de chant | Invité |

# Remerciements

Une thèse est certes une réflexion scientifique qui mûrie pendant trois ans, mais c'est aussi un travail fait de relations humaines, dont je tiens à remercier les principaux acteurs.

Je souhaite tout d'abord remercier chaleureusement Boris Doval qui a accepté la responsabilité de directeur de thèse. J'ai été très sensible à l'enthousiasme et à la curiosité qu'il manifeste lors de toute discussion scientifique. Sa finesse d'appréciation et de réflexion, sa rigueur sont des éléments qui, je crois, transparaissent dans mon rapport et qui viennent de lui. Je lui suis aussi très reconnaissant de m'avoir accordé la possibilité de cadrer avec lui mon travail, pour que je sois satisfait du thème de ma thèse et qu'il se sente également à l'aise dans son travail d'encadrement.

Je voudrais également adresser toute ma reconnaissance à Michèle Castellengo. Bien qu'ayant laissé la charge de direction à Boris Doval, Michèle est restée présente et m'a permis d'effectuer un travail qui s'inscrit pleinement dans la tradition des thèses soutenues au LAM. C'est elle qui m'a suggéré de développer les parties les plus proches de la musique, c'est aussi elle qui m'a presque forcé à organiser les ateliers voix chantée ; une des choses pour lesquelles je me sens le plus redevable. Je m'estime vraiment privilégié du fait qu'elle ait pu me transmettre une partie de son expertise et de sa réflexion quant à l'acoustique musicale. J'achève ma thèse en gardant en mémoire sa bonne humeur et sa passion communicatrice pour l'étude de la voix chantée.

Une thèse sur la voix chantée d'existerait pas sans chanteurs. Je tiens à exprimer toute ma gratitude envers l'un d'entre eux, Robert Expert. Je lui dois ce travail, ni plus, ni moins. Robert a été présent de façon décisive depuis l'obtention de mon financement de thèse jusqu'au jury de soutenance, en passant par l'orientation scientifique de mon travail, ou bien sûr, les séances d'enregistrement. Il m'a donc permis d'orienter mon étude sur une problématique pertinente pour les chanteurs, ce qui me tenait à coeur au départ de mon travail. Je tiens donc à le remercier pour sa générosité sans limites à mon égard, générosité qu'il sait par ailleurs si magnifiquement incarner dans son chant. A la suite de Robert, je souhaite exprimer ma reconnaissance à l'ensemble des chanteurs ayant participé à mon protocole d'enregistrement : Aline Désesquelles, Anna Zumbansen, Benjamin Frugier, Bernard Bonin, Clément Vaccari, Julia Beaumier, Karl Baraquin, Lucie Notin, Matthieu Cabanès, Mélodie Ruvio, Nicolas Jaillet, Pascal Bezard, Philippe Scagni, Sébastien d'Oriano, Sophie Quattrocchi et Thierry le Meur. J'ai également une pensée pour Barbara Klossner, venue de Suisse pour nous, ainsi que pour Marthe Vassallo.

Ma thèse est aussi le résultat d'interactions diverses. Je souhaite à ce titre remercier Danièle Dubois et Luiza Maxim qui m'ont permis de mettre une petite touche de sciences humaines dans mon travail. J'ai beaucoup apprécié de pouvoir discuter avec l'ensemble de l'équipe LCPE du laboratoire, leur présence amène un positionnement différent quand à nos objets d'étude, donc, je crois, une ouverture d'esprit et une vision plus large. Je remercie également les fidèles de l'atelier voix chantée, leur présence aux réunions m'a permis de développer une vision pluridisciplinaire de la voix chantée.

Dans le domaine de l'acoustique de la voix, j'ai eu la possibilité de discuter avec de nombreuses personnes. Je souhaite notamment remercier Nathalie Henrich qui m'a permis de mettre un pied dans la communauté. J'ai également une pensée pour Antoine Chaigne qui m'a permis de découvrir l'acoustique musicale. Je remercie aussi Jacques Poitevineau qui m'a conseillé sur l'utilisation des tests statistiques, Sophie Albert qui a effectué son stage de master sous ma direction. Je voudrais également remercier l'ensemble des personnes qui ont passé du temps à relire mon manuscrit de thèse, en particulier Bernard Roubeau, Maeva Garnier et Claire Pillot,

qui m'ont donc permis d'en améliorer très significativement la qualité.

J'ai eu la chance d'évoluer au sein du LAM pendant ces trois années. Il s'agit, je crois, d'un laboratoire tout à fait particulier, de part son orientation autours de la musique. Je voudrais exprimer ma gratitude envers l'ensemble de son personnel, en particulier Hugues Genevois qui est responsable de l'équipe, à Jean-Dominique Polack qui a accepté de prendre la direction de ma thèse au niveau administratif. Je souhaite aussi exprimer toute mon amitié à François Blanc, Guillaume Defrance, et surtout Henri Boutin qui a supporté ma présence physique et sonore dans son bureau pendant la dernière année !

Je voudrais terminer en remerciant Anne Lacoste. Sans elle, ma thèse n'aurait jamais vu le jour, puisque dans un élan de générosité qui me dépasse, Anne a accepté avec enthousiasme de financer à titre privé la totalité de ma bourse de thèse. Chère Anne, ta contribution m'a permis, c'est vrai, de m'investir pleinement dans ce travail de thèse dont les résultats sont consignés dans le présent manuscrit. Tu m'as aussi permis d'acquérir une culture scientifique, des méthodes, d'évoluer au sein du LAM pendant ces trois ans. Par ton financement tu m'as permis d'entreprendre des activités qui me tenaient à coeur, comme prendre des cours de chant. Tu as ainsi contribué à ta façon à mon évolution personnelle, et pour cela je ne sais comment te dire merci. Je formule simplement le voeu que, un jour, d'une façon où d'une autre, tu en soies remerciée.

# Sommaire

# Abréviations

**Signaux :**
EGG : signal électroglottographique

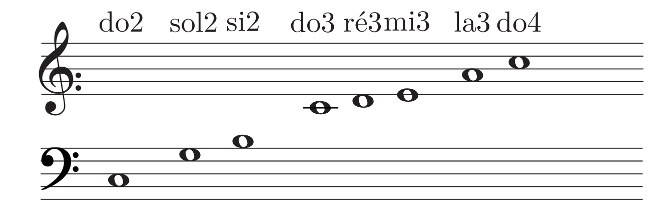
**Paramètres glottiques ou acoustiques :**
VLP (Vertical larynx Position) : position verticale du larynx
Oq : quotient ouvert
$f_0$ : fréquence fondamentale / fréquence vibratoire glottique
SPL (Sound Pressure Level) : niveau de pression acoustique

**Paramètres spectraux :**
FB (Frequency Band) : bande fréquentielle
ER (Energy Ratio) : rapport d'énergie
Fi : fréquence du i$^{\text{ième}}$ formant

**Voyelles :**
/i/ : comme dans am**i**
/o/ : comme dans g**au**che
/ɔ/ : comme dans p**o**mme
/a/ : comme dans n**a**ppe

/ø/ : comme dans d**eu**x
/œ/ : comme dans m**eu**ble
/u/ : comme dans d**ou**x
/y/ : comme dans m**û**re
/ɛ/ : comme dans l**ai**t
/e/ : comme dans bl**é**

**Notes de musique :**




**Conventions statistiques :**

| | | |
|---|---|---|
| p<0.001 : | *** | (très significatif) |
| 0.001<p<0.01 : | ** | (significatif) |
| 0.01<p<0.1 : | * | (peu significatif) |
| p>0.1 : | ns | (non significatif) |

# Liste des exemples sonores

Plusieurs exemples sonores ont été utilisés pour illuster ce travail. Ces sons sont disponibles, sur demande, à l'équipe Lutheries, Acoustique et Musique (LAM) de l'Institut Jean le Rond d'Alembert; 11, rue de Lourmel, 75015 PARIS, ou via le site internet www.lam.jussieu.fr.

[1] Glissando ascendant effectué par une femme, couvrant les quatre mécanismes vibratoires laryngés.
[2] Glissando ascendant et descendant effectué par un ténor (T4). Voyelle : /i/.
[3] Son tenu ($f0 = 118Hz$) effectué par un ténor (T3), avec plusieurs changements de voyelles.
[4] Decrescendo effectué par une soprano (S3), sur sol#3 et sur la voyelle /o/, en mécanisme M2.
[5] Son tenu chanté par un contre-ténor (CT1), sur do3 et en mécanisme M2, avec changement de voyelle (début sur /a/, fin sur /i/).
[6] Autre exemple de son tenu chanté par un contre-ténor (CT1), sur do3 et en mécanisme M2, avec changement de voyelle (début sur /a/, fin sur /i/).
[7] Decrescendo effectué par un ténor (T1) sur ré3 et sur la voyelle /a/, en mécanisme M1.
[8] Decrescendo effectué par une soprano (S3) sur sib3 et sur la voyelle /a/, en mécanisme M2.
[9] Decrescendo effectué par une mezzo-soprano (MS3) sur mi3 et sur la voyelle /i/, en mécanisme M2.
[10] Decrescendo effectué par une mezzo-soprano (MS4) sur mi3 et sur la voyelle /a/, en mécanisme M1.
[11] Decrescendo effectué par une mezzo-soprano (MS4) sur mi3 et sur la voyelle /a/, en mécanisme M2.
[12] Exemple de yodel suisse.
[13] Exemple d'utilisation du tahrir.
[14] Exemple de tahrir effectué sur mib3, et sur la voyelle /a/.
[15] Exemple de tahrir effectué sur mib3, et sur la voyelle /i/.
[16] Son tenu marqué par plusieurs alternances de mécanismes laryngés (M1 et M2) effectué par un baryton-basse (B3), sur fa#3 et sur voyelle /a/.
[17] Son tenu marqué par l'alternance des mécanismes laryngés M1 et M2, mais pour lesquels les sauts de fréquence sont très petits. Production effectuée par une mezzo-soprano (MS2) sur fa#3 et sur la voyelle /a/.
[18] Crescendo effectué par un contre-ténor (CT1) sur un do2, et sur la voyelle /a/, en mécanisme M1.

# Introduction

Le chant est une activité partagée par tous les humains, dans toutes les cultures et depuis la nuit des temps. Le relatif isolement de différentes cultures traditionnelles a favorisé le développement de pratiques vocales extrêmement diverses, que le monde occidental découvre depuis plusieurs décennies (voir les enregistrements effectuées lors de l'exposition universelle de 1900, ou pour une publication récente, les CDs «les voix du monde», Zemp *et al.*, 1996), parfois avec stupéfaction.

Au niveau physiologique et acoustique, toutes ces pratiques vocales sont pourtant produites par un instrument de musique, l'appareil vocal, et mettent en jeu le même processus physique: de par l'expiration, une vibration acoustique est générée quelque part dans l'appareil vocal (dans la plupart des cas, au niveau du larynx), se propage dans le conduit vocal et rayonne dans le milieu extérieur. La plupart des traditions musicales utilisant les sons voisés (produit par la vibration des cordes vocales) doit donc jouer simultanément sur la vibration laryngée et sur la propagation de l'onde sonore dans le conduit vocal.

En termes de vibration laryngée, le chant lyrique occidental occupe une place particulière dans la mesure où il nécessite la production d'une très large étendue de fréquence : certaines basses peuvent descendre au do1 (66 Hz) (comme pour le rôle de Zarastro, dans l'opéra «La flûte enchantée» de Mozart), et des soprani peuvent monter au sol5 (1568 Hz) (comme dans l'air de concert «Popoli di Tessaglia», de Mozart aussi). Couvrir une bande de fréquence aussi large avec un si petit instrument (les cordes vocales ont une longueur de l'ordre de 1.5 cm) nécessite l'utilisation de différentes configurations vibratoires, que nous appellerons mécanismes laryngés au cours de cette thèse [1]. Dans le même temps, les chanteurs vocalisent ou articulent un texte. Quelle est la nature de la relation entre la vibration laryngée et la production des voyelles ? Comment les chanteurs la gèrent-ils ? Accomplissent-ils des ajustements différents en fonction du mécanisme laryngé utilisé?

De nombreuses études ont porté sur le fonctionnement physiologique et acoustique de l'appareil phonatoire (Fant, 1970; Titze, 1994; Sundberg, 1987). Nous disposons aujourd'hui d'une connaissance assez précise du fonctionnement laryngé d'une part (Hirano *et al.*, 1969; Fant, 1970; Roubeau, 1993; Henrich, 2001), ainsi que de l'acoustique du conduit vocal d'autre part (Flanagan, 1965; Story, 1995). Pour modéliser le système dans son ensemble, les chercheurs ont modélisé ces deux niveaux de productions de manière indépendante (Fant, 1970; Flanagan, 1965). La raison essentielle est probablement que les études ont été orientées sur la production de la parole, pour laquelle l'hypothèse d'indépendance de ces deux niveaux de production a permis d'obtenir des résultats satisfaisants.

En ce qui concerne la pratique du chant, l'hypothèse d'indépendance de la source et du filtre n'est probablement pas valide, que cette indépendance soit située au niveau du fonctionnement de l'appareil vocal ou de la façon dont le chanteur l'utilise. En particulier, il est connu que les chanteurs (lyriques comme traditionnels) adaptent la voyelle en fonction de la hauteur (Sundberg, 1975; Joliveau *et al.*, 2004a; Henrich *et al.*, 2007), phénomène qui est connu des physiciens comme des musiciens (nous développerons ce point dans les chapitres 1 et 2). Les chanteurs ne «gèrent» donc pas la source et le filtre indépendamment l'un de l'autre. A priori, ces ajustements peuvent être dus au fonctionnement de l'appareil vocal, ou être effectués volontairement par le chanteur. Existe-t-il des ajustements effectués avec une configuration laryngée et pas une autre

1. Le terme de mécanisme laryngé sera défini précisément dans le chapitre 1.2

(indépendamment de la hauteur du son) ? Sont-ils recherchés ou évités par les musiciens?

Pour tenter de répondre à ces questions, nous avons étudié, dans les deux principaux mécanismes laryngés, l'influence de la voyelle sur des paramètres de la production vocale qui sont essentiels pour les physiciens comme pour les chanteurs : nous avons étudié la dynamique vocale et la répartition de l'énergie dans le spectre. Ces deux aspects de la voix nous permettent d'approcher acoustiquement la notion perceptive (et musicale) d'intensité vocale et de timbre. Nous allons décrire leurs variations en fonction de la hauteur. Nous allons également étudier l'utilisation des voyelles pour gérer les transitions d'une configuration vibratoire à l'autre.

## Présentation générale de l'étude

### La problématique

Dans une première partie, nous allons présenter le fonctionnement vocal et la façon dont il est décrit par la science acoustique. Nous verrons qu'il met en jeu le niveau glottique et le niveau résonantiel. Nous présenterons les relations entre ces deux niveaux de production vocale, dans la parole et dans le chant, et nous verrons comment elles intègrent les configurations vibratoires laryngées que nous étudions à travers les mécanismes.

Nous présenterons également nos investigations visant à expliciter l'expertise qu'ont les chanteurs par rapport aux mécanismes et aux voyelles. Nous avons en particulier étudié plusieurs traités de chant, interviewé un chanteur et effectué une enquête écrite au près de 16 chanteurs.

### Mécanismes laryngés, voyelles et phonétogrammes

Dans une deuxième partie, nous allons étudier l'influence de la voyelle sur la dynamique vocale dans les deux mécanismes vibratoires laryngés principaux. Cette étude est effectuée à travers le phonétogramme, établi séparément dans les deux mécanismes laryngés. Pour cela, une vaste base de données a été mise en place au cours de ce travail avec le concours de 21 chanteurs. Elle permet l'étude de la dynamique vocale, de paramètres acoustiques et glottiques en fonction de la hauteur, de l'intensité, de la voyelle et du mécanisme laryngé. Ces enregistrements permettent également de valider la voyelle utilisée par mesures formantiques. La comparaison des phonétogrammes dans les deux mécanismes laryngés permettra d'établir dans quelle mesure l'influence de la voyelle sur la dynamique vocale est la même.

Nous décrirons ensuite l'évolution du quotient ouvert, de la position verticale du larynx et de l'amplitude du signal électroglottographique (indice de la surface de contact maximale des cordes vocales au cours du cycle glottique) au sein du phonétogramme, l'objectif étant d'établir comment ces paramètres sont influencés par la voyelle. Le quotient ouvert est un paramètre de source dont l'influence dans la forme de l'onde de débit glottique a été modélisée, ce qui nous permettra d'évaluer son rôle dans l'influence de la voyelle sur les limites phonétographiques. Les deux autres paramètres glottiques seront d'abord étudiés en fonction de la hauteur, de l'intensité, du mécanisme laryngé, pour prendre enfin en compte l'influence de la voyelle.

### Mécanismes laryngés, voyelles et spectres

Dans la troisième partie, nous verrons si la voyelle influence dans de mêmes proportions la répartition de l'énergie dans le spectre dans les deux mécanismes laryngés. Pour cela, nous avons défini trois bandes fréquentielles. La première va de 0 à 2 kHz pour les hommes et de 0 à 2.4 kHz pour les femmes, et correspond aux basses fréquences. La deuxième va de 2 à 4.5 kHz pour les hommes, de 2.4 kHz à 5.4 kHz pour les femmes, et englobe le formant du chanteur, renforcement spectral particulièrement développé par les chanteurs lyriques, et la troisième, de 4.5 à 10 kHz pour les hommes et de 5.4 kHz à 12 kHz pour les femmes, correspond aux hautes fréquences.

L'énergie dans la deuxième bande sera plus particulièrement étudiée en fonction de la tessiture des chanteurs, de leur utilisation des différents mécanismes laryngés. Nous verrons comment l'énergie du formant du chanteur varie avec l'intensité, dans quelle mesure elle dépend de

la voyelle et du mécanisme laryngé. Enfin, nous étudierons l'énergie dans la troisième bande fréquentielle, et nous verrons si elle dépend du mécanisme laryngé, et de la voyelle.

**Mécanismes laryngés, voyelles et transitions de mécanismes**

Dans la quatrième partie, nous traiterons de l'influence de la voyelle sur les sauts de fréquences se produisant lors des transitions de mécanismes laryngés. Nous décrirons le phénomène physique et nous verrons que plusieurs techniques vocales issues de différentes traditions, utilisent de façons très différentes ces transitions. Nous décrirons en particulier le yodel qui utilise les voyelles d'une façon tout à fait particulière, et verrons dans quelle mesure cette technique peut être rapprochée des descriptions des chanteurs que nous avons recueillies et présentées au cours de la première partie.

L'étude des transitions de mécanismes laryngés a nécessité l'enregistrement d'une nouvelle base de données, à laquelle ont contribué 7 des 21 chanteurs précédents. Nous décrirons cette base de données et présenterons les résultats qu'elle nous a permis d'établir. Nous nous intéresserons notamment à l'intervalle du saut de fréquence ainsi qu'à la fréquence de départ des transitions de mécanisme. Les résultats seront discutés et confrontés à la littérature.

Finalement nous conclurons notre étude en résumant les principaux résultats. Ce travail cherche donc à contribuer à la compréhension des phénomènes physiques régissant la production vocale, en s'approchant d'une description aussi globale (et précise) que possible, et au plus proche de la (ou des) conceptions(s) que les chanteurs ont de leur voix.

# Première partie

# La voix chantée : l'approche scientifique et celle des chanteurs

# Chapitre 1

# L'appareil phonatoire et son fonctionnement

Les mécanismes de production de la voix sont longtemps restés très mystérieux. Depuis deux siècles environ, l'évolution très rapide de la médecine et des techniques d'investigation a permis de mieux comprendre comment le son était généré avant d'être rayonné dans le milieu extérieur. Nous allons voir dans ce chapitre quel est le fonctionnement physiologique de la production vocale, du moins de ce que l'on en sait aujourd'hui et qui concerne directement notre problématique. Les aspects acoustiques seront aussi étudiés, ainsi que les méthodes d'étude utilisées.

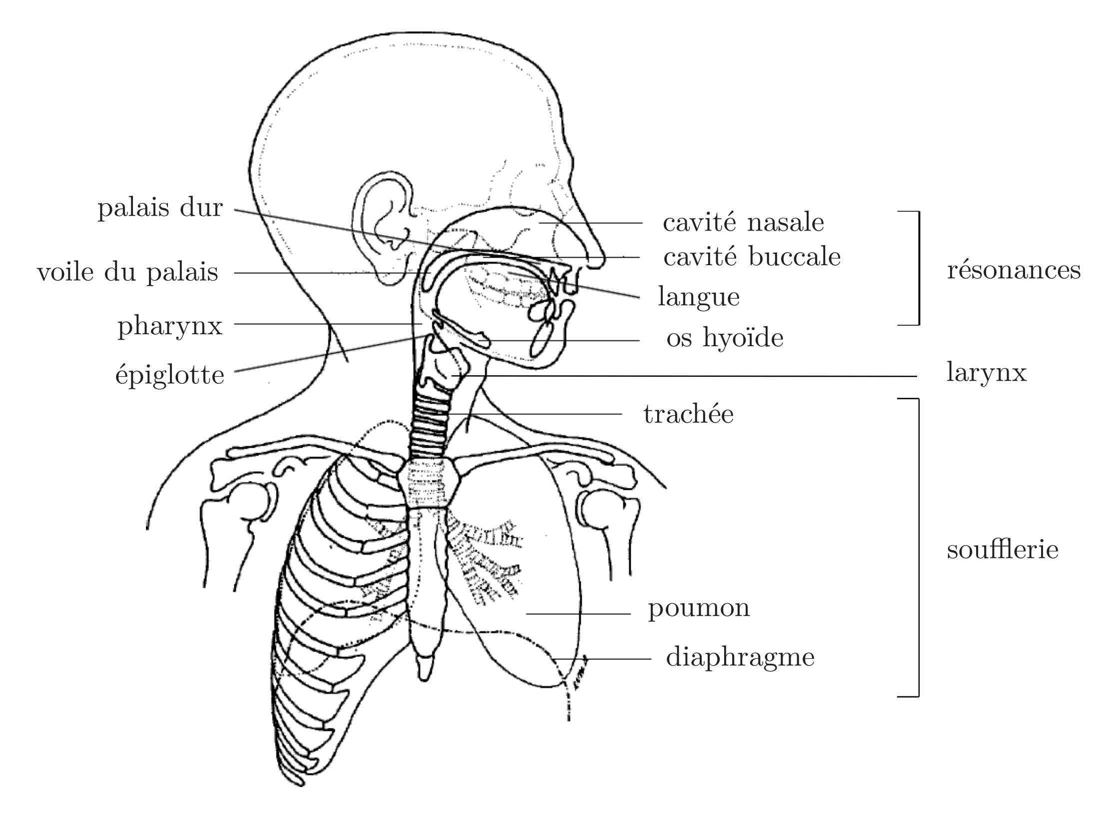



Fig. 1.1 – *Vue générale de l'appareil vocal. D'après Leothaud (2004).*

L'ensemble de l'appareil vocal est schématisé figure 1.1. Sa physiologie globale est décrite par trois étages distincts : la soufflerie, le larynx et les résonateurs. La soufflerie correspond à l'ensemble de l'appareil respiratoire (les poumons et les muscles respiratoires). La gestion de la respiration dans le chant est un élément complexe et fondamental. Dans l'ensemble de notre travail, nous le ramènerons à la connaissance de la pression sous-glottique, qui correspond à la pression à l'intérieur de la trachée, juste en dessous du larynx. Cette pression influence directement les caractéristiques vibratoires des cordes vocales, qui sont les éléments fondamentaux

(pour notre propos) constitutifs du larynx. Nous reviendrons en détails sur l'anatomie et le fonctionnement du larynx dans la partie 1.1, ainsi que les méthodes d'explorations du larynx et les modèles permettant de décrire sa fonction. Nous verrons dans la partie 1.2 comment décrire la vibration laryngée. L'onde sonore générée au niveau laryngé se propage ensuite dans le pharynx, dans la cavité buccale, ainsi que dans la cavité nasale si le voile du palais est abaissé, ce qui provoque une redistribution de l'énergie acoustique dans le spectre. Nous détaillerons le fonctionnement de l'étage résonantiel dans la partie 1.3. Enfin nous présenterons en partie 1.4 quelles dépendances ou interactions ont été mises en évidence entre la vibration laryngée et le conduit vocal.

## 1.1 Le larynx

### 1.1.1 Description anatomique et physiologique du larynx

Le larynx est un organe complexe situé dans le cou, au niveau de l'extrémité supérieure de la trachée. Sa fonction principale est d'obturer le conduit respiratoire lors de la déglutition. Nous ne présenterons ici que ses principaux éléments constitutifs, nécessaires à notre étude.

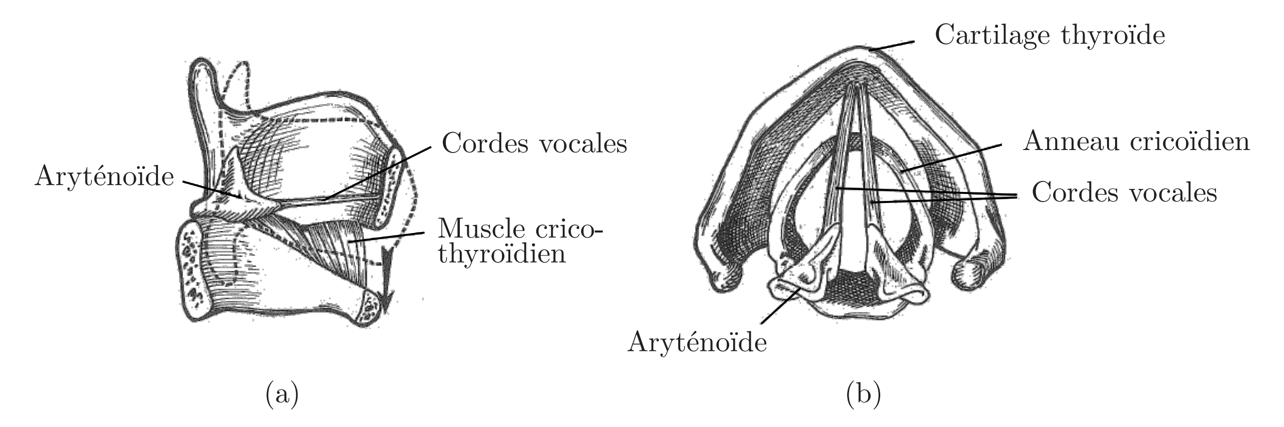



Fig. 1.2 – *Représentation des principaux cartilages et muscles intrinsèques au larynx. (a) Vue de côté (b) vue de dessus. D'après Legent* et al. *(1975).*

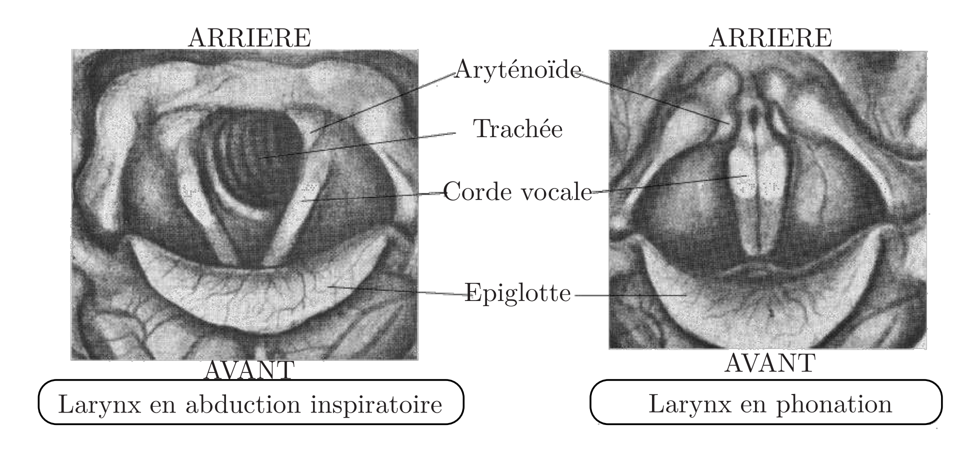



Fig. 1.3 – *Images laryngoscopiques d'un larynx en abduction respiratoire et en phonation. D'après Husson (1962).*

Les principaux muscles et cartilages laryngés sont présentés figure 1.2. Le cartilage thyroïde est situé à l'avant du larynx, l'une de ses proéminence correspond à la pomme d'Adam. Les cordes vocales correspondent à deux replis pouvant, lorsqu'elles sont en contact, venir obstruer totalement le conduit respiratoire. Elles peuvent également s'ouvrir, comme présenté sur la figure 1.3, par exemple lors de la phase inspiratoire. On appelle alors glotte l'espace entre les cordes vocales.

La musculature laryngée est habituellement décrite à travers deux catégories :

1. la musculature intrinsèque, qui agit directement sur les cordes vocales et sur leur vibration.
2. la musculature extrinsèque, qui concerne la position du larynx et sa mobilité.

**La musculature intrinsèque**

Les cordes vocales sont principalement constituées du muscle thyro-aryténoïdien, appelé également muscle vocal ou vocalis. La contraction de ce muscle influence directement les caractéristiques vibratoires des cordes vocales que sont, par exemple, leur tension ou leur masse vibrante. Il peut être étiré sous l'action antagoniste du muscle crico-thyroïdien. Ce dernier est attaché à une extrémité au niveau du cartilage cricoïde (situé directement au dessus du premier anneau trachéal) et à l'autre extrémité au cartilage thyroïde. Sa contraction provoque une bascule en avant du cartilage thyroïde comme présenté figure 1.2.

**Une structure en couche**

La figure 1.4 présente une schématisation de coupe verticale d'une corde vocale. Nous pouvons y lire que les cordes vocales ne sont pas constituées que du muscle thyro-aryténoïdien. Elles sont formées de plusieurs couches, dont le muscle vocal constitue la plus profonde. La couverture de la corde vocale est constituée d'une muqueuse, de l'épithélium ainsi que d'une couche superficielle. Le muscle vocal est séparé de cette couverture par un espace constitué d'une couche intermédiaire et d'une couche profonde. Cette structure particulière est importante car elle confère aux cordes vocales des propriétés vibratoires que nous détaillerons dans la partie 1.2.

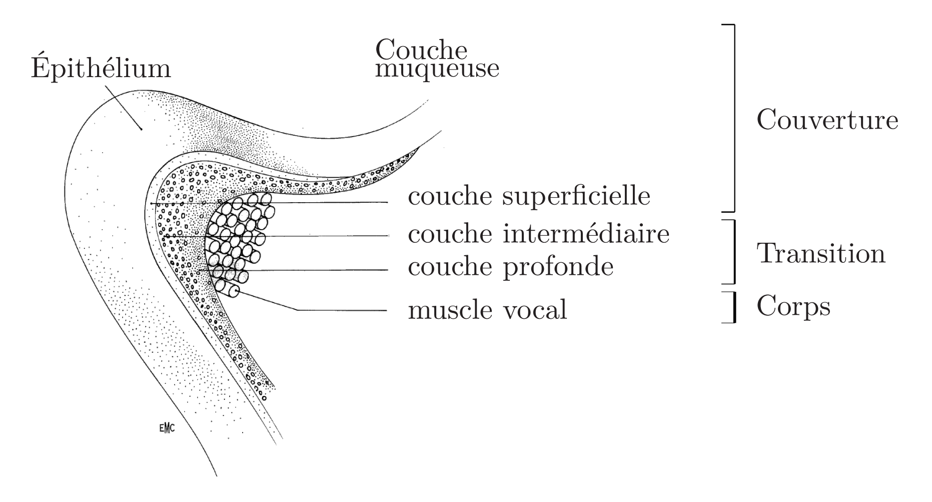



Fig. 1.4 – *Schématisation d'une coupe verticale de corde vocale. Adapté de Lacau St Guily et Roubeau (1994), d'après Hirano (1982).*

**La musculature extrinsèque**

Le larynx est un organe souvent qualifié de «suspendu». En effet, il n'est pas constitué d'os, et est mobile par rapport au reste du corps, ce qui lui confère la mobilité nécessaire pour la déglutition, mais qui est également importante pour le chant. La position du larynx est régulée par un vaste ensemble de muscles extrinsèques dont les principaux sont schématisés figure 1.5. Remarquons notamment le muscle sterno-thyroïdien dont la contraction a pour effet d'abaisser le larynx, et le thyro-hyoïdien, qui a au contraire pour effet de le faire monter. L'os hyoïde, qui n'est pas solidaire du reste du squelette, est lui même est un élément clé dans la régulation de la position du larynx. Il est relié à la mandibule par le muscle mylo-hyoïdien, et est le support de la base de la langue. Des mouvements de ces organes peuvent donc entrainer des mouvements de l'os hyoïde. La contraction du muscle stylo-hyoïdien provoque une élévation de l'os hyoïde, celle du muscle sterno-hyoïdien l'abaisse.

Nous retiendrons que la position du larynx est le résultat d'un équilibre complexe, pouvant être influencé par la forme de la langue ou la position de la mandibule.

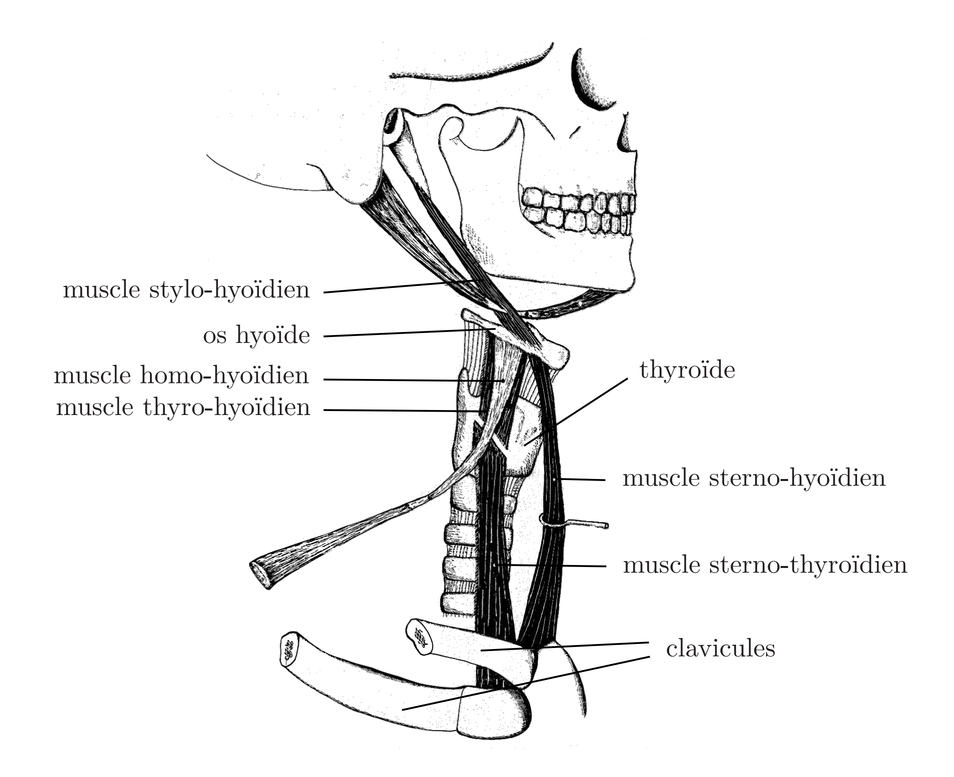



Fig. 1.5 – *Appareil suspenseur du larynx. D'après Le Huche et Allali (1984)*

### 1.1.2 Méthodes exploratoires du larynx

Depuis Garcia (1863) qui observait le larynx à l'aide d'un petit miroir qu'il maintenait au fond de la bouche du patient, de très nombreuses méthodes ont été développées pour observer l'appareil vocal. Nous nous contenterons de présenter les méthodes qui seront mentionnées dans cette étude.

#### Estimation de pression sous-glottique

La mesure directe de pression sous-glottique est une opération délicate, puisqu'elle nécessite d'introduire un capteur de pression dans la trachée, juste en dessous du larynx (par ponction trachéale). Cette méthode est donc très invasive et constitue un acte médical. Plusieurs chercheurs l'ont néanmoins utilisée pour effectuer des mesures en parole (Bucella *et al.*, 2000) et en voix chantée (Pillot, 2004; Randi, 2008).

Dans la plupart des études, la pression sous-glottique est estimée à partir de la pression mesurée dans la bouche (pression intra-orale). Cette méthode nécessite un protocole précis, car dans le cas général (et en phonation), la pression dans la bouche est proche de la pression atmosphérique et non de la pression sous-glottique. Pour cela, les sujets doivent produire des sons du type «papa». La pression sous-glottique estimée lors de la phonation du /a/ est assimilée à celle mesurée dans la bouche pendant le «p», alors que la bouche était fermée et la glotte ouverte. Cette méthode est considérée comme une estimation fiable de la pression sous-glottique (Löfqvist *et al.*, 1982).

#### La visualisation du larynx

Dans le domaine médical, la laryngoscopie stroboscopique est très largement utilisée pour observer la vibration des cordes vocales. Cette méthode consiste à observer les cordes vocales à l'aide d'un endoscope introduit dans la bouche ou le nez (par fibroscopie) du chanteur (ou du patient), et à éclairer la glotte de façon discontinue selon le principe de la stroboscopie. Elle permet de visualiser une vibration glottique en même temps que d'écouter le son produit par le chanteur. Néanmoins la vibration observée ne correspond pas à un cycle glottique effectif du

fait de la stroboscopie, et cette méthode d'observation ne permet pas d'étudier les phénomènes transitoires.

Pour pallier à ces problèmes, des systèmes d'acquisitions ont été mis en place, permettant d'enregistrer les images de la glotte à une fréquence allant à 4000 Hz ou 8000 Hz, ce qui permet d'étudier très précisément la vibration des cordes vocales : il est alors possible d'acquérir plusieurs images par cycle glottique.

Pour étudier des productions chantées, ces méthodes présentent le désavantage d'être invasives. Introduit par voie orale, l'endoscope perturbe le chanteur, qui n'est plus libre d'articuler la voyelle qu'il souhaite. La qualité vocale est également fortement perturbée. La fibroscopie permet de limiter cet inconvénient, au prix d'une moins bonne résolution.

### L'électroglottographie

L'électroglottographie est une méthode d'étude non invasive des vibrations laryngées. Un électroglottographe est constitué de deux paires d'électrodes que l'expérimentateur positionne sur le cou du chanteur, de part et d'autre du larynx (Henrich, 2001). L'appareil génère un courant de très faible intensité (et d'intensité constante) et très haute fréquence qui circule d'une électrode à l'autre via le cou du chanteur, et délivre un signal correspondant à l'impédance du cou du chanteur. Cette impédance varie fortement en fonction de l'accolement des cordes vocales, et le signal électroglottographique (EGG) correspond à une estimation de la surface de contact des cordes vocales.

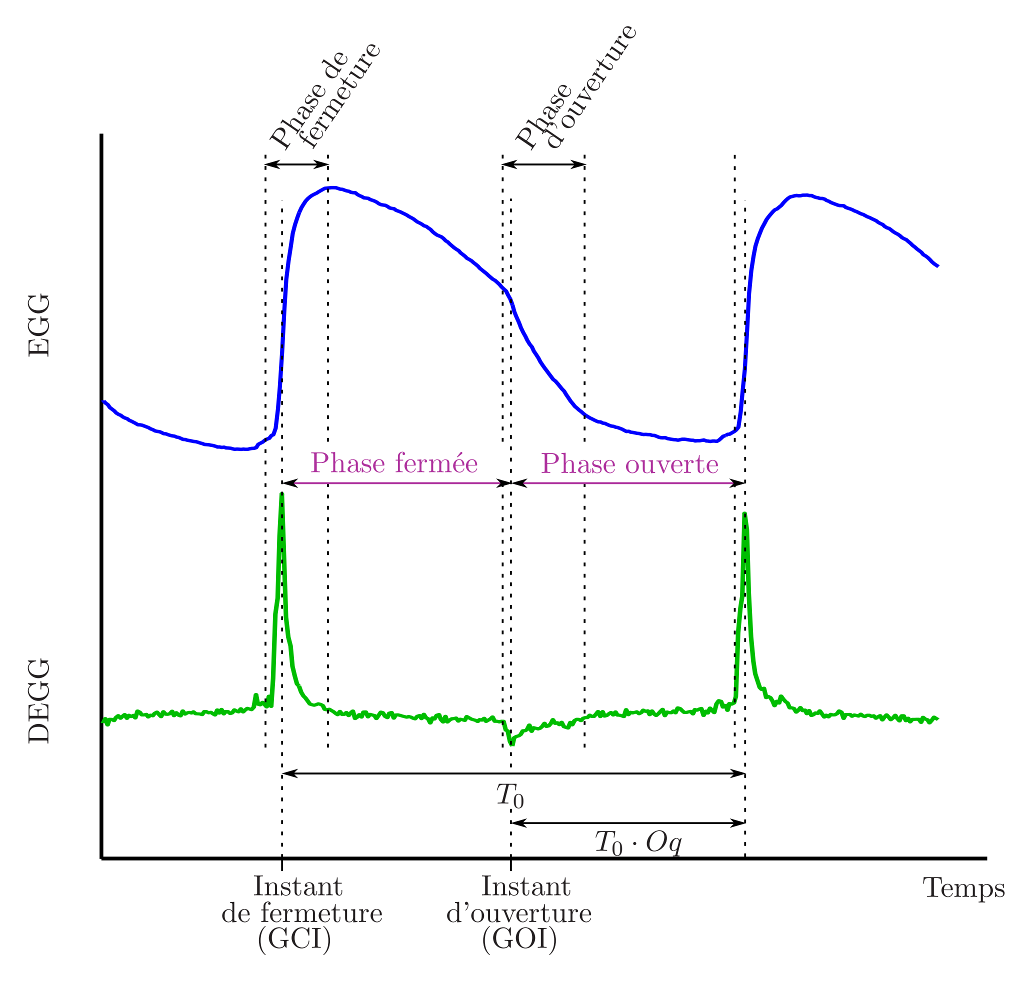



Fig. 1.6 – *Exemple de signal EGG et de sa dérivée. $T_0$ correspond à la période fondamentale et Oq au quotient ouvert, défini comme le rapport de la durée de la phase ouverte par la période fondamentale.*

Nous avons représenté sur la figure 1.6 un peu plus d'une période d'un signal EGG ainsi que de sa dérivée (DEGG). Lors de la phase ouverte, la surface de contact des cordes vocales est

faible, donc le signal EGG est faible. Au contraire lors de la phase fermée, la surface de contact est plus importante, donc le signal EGG est plus grand. Comme décrit par Henrich (2001), les phases d'ouverture et de fermeture glottiques sont marquées par un changement rapide de la surface de contact des cordes vocales, d'où les pics observés sur les signaux dérivés. Les instants d'ouverture et de fermeture correspondent aux extremums du signal DEGG. La détection de ces pics permet d'estimer précisément la période fondamentale ainsi que le quotient ouvert.

Le signal EGG, qui décrit indirectement la surface de contact des cordes vocales, permet de caractériser très efficacement les mécanismes laryngés. Nous reviendrons sur ce point dans la partie 1.2.1.

### 1.1.3 Modéliser la fonction laryngée

De très nombreux auteurs ont cherché à modéliser différents aspects de la fonction laryngée. Il est par exemple possible de modéliser l'action des différents muscles intrinsèques ou extrinsèques du larynx en phonation (voir par exemple Vilkman *et al.*, 1996). Il est également possible de représenter la vibration physique des cordes vocales (Ishizaka et Flanagan, 1972). D'autres auteurs ont plutôt cherché à décrire le signal sonore résultant de la vibration glottique (Fant *et al.*, 1985). Le choix d'un modèle plutôt que d'un autre est effectué par les auteurs en fonction des problématiques qu'ils développent ainsi que de leur domaine de compétence. Compte tenu de notre problématique liant vibration glottique et voyelles, et de la littérature que nous citerons au cours de notre travail, nous allons maintenant présenter deux types de modélisations différentes : l'une, plutôt mécanique, représentant la vibration des cordes vocales, et l'autre, issue du traitement de signal, décrivant l'onde de débit glottique.

#### La vibration glottique

Le principe des modélisations de la vibration glottique consiste à définir un système et sa fonction à modéliser (le larynx, sa vibration), pour pouvoir déterminer des paramètres de sortie (onde de débit glottique, aire glottique) en fonction des paramètres d'entrée (pression sous-glottique, constantes caractéristiques du modèle, conditions initiales).

Pour modéliser la vibration des cordes vocales, Titze (1994) a décrit une corde vocale par un oscillateur harmonique dont la masse, la tension et la raideur sont à régler pour approcher le plus possible une réalité physiologique. Le modèle le plus utilisé est le modèle à deux masses, introduit par Ishizaka et Flanagan (1972). Le principe de base de cette modélisation est présenté figure 1.7. Chaque corde vocale est modélisée par deux oscillateurs (de masse m1 et m2) couplés. L'intérêt principal de ce modèle est de tenir compte du déphasage entre le bas et le haut de la zone d'accolement.

D'autres modèles comme par exemple un modèle à 16 masses (Titze, 1973) ou des descriptions par éléments finis (Alipour *et al.*, 2000) ont été proposés dans la littérature, nous n'en ferons pas mention dans ce travail. Une revue bibliographique a été effectuée par Kob (2002).

#### L'onde de débit glottique

Alors que l'approche par modèle physique vise à établir l'onde de débit glottique (ODG) à partir d'un lot de paramètres décrivant la vibration glottique, les modèles de signaux ont pour finalité de décrire directement cette onde de débit glottique. Pour effectuer de la synthèse de parole en temps réel, il est nécessaire de contrôler le système par un nombre de paramètres le plus petit possible. Dans cette optique, l'onde de débit glottique est modélisée par une oscillation périodique, dont la période correspond à la fréquence de vibration glottique. Lorsque la glotte est fermée, l'ODG est nulle. La phase ouverte peut être décrite par une phase d'ouverture glottique (le débit augmente) et une phase de fermeture (le débit diminue). Plusieurs modèles d'ODG ont été proposés, et Doval *et al.* (2006) ont cherché à les unifier en décrivant l'oscillation par un jeu de cinq paramètres :

– $E$, l'excitation maximale, correspondant à la vitesse de fermeture des cordes vocales

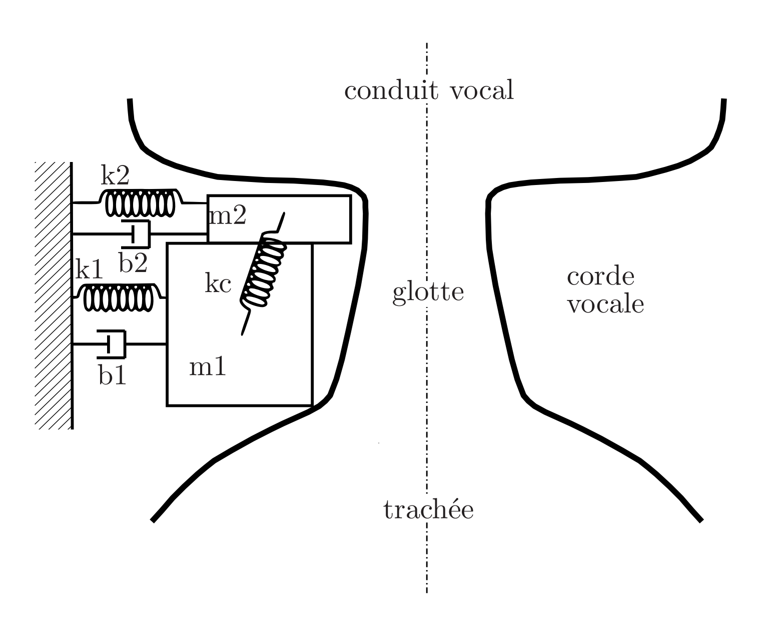



Fig. 1.7 – *Schématisation du principe du modèle à deux masses. Adapté de Lucero (2005).*

- $T_0$, la période fondamentale
- $Oq$ le quotient ouvert, défini comme la durée de la phase ouverte relativement à la période
- $\alpha_m$, le coefficient d'asymétrie, défini comme la durée de la phase d'ouverture relativement à la durée de la phase ouverte
- $Q_a$, le quotient de phase de retour, décrivant la vitesse avec laquelle l'ODG dérivée revient à zéro après la fermeture glottique.

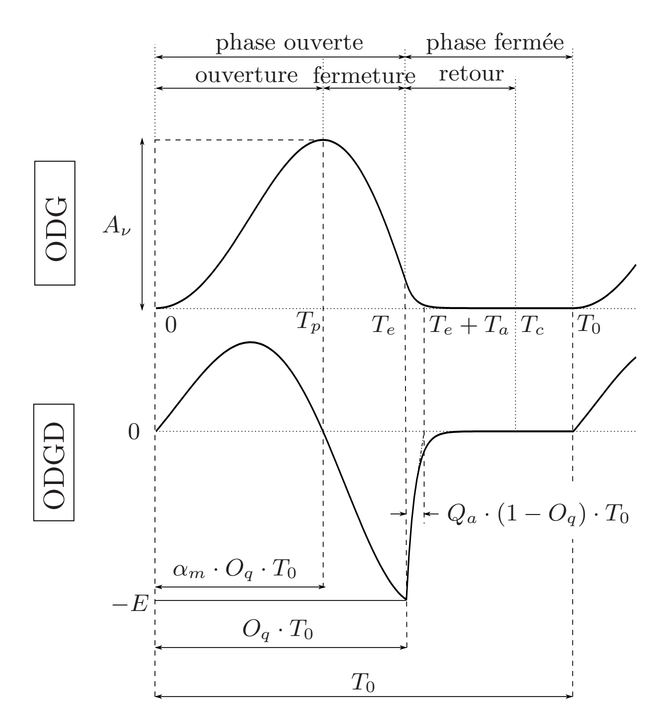



Fig. 1.8 – *Représentation schématique d'une onde de débit glottique ainsi que de sa dérivée. Adapté de Doval* et al. *(2006). Remarquons que les phases d'ouverture et de fermeture glottique ne doivent pas être identifiées à celles définies sur le signal EGG (figure 1.6), les deux définitions proposées ne sont pas équivalentes.*

Ces paramètres sont tous définis dans le domaine temporel. Dans le domaine spectral, un tel signal correspond à un filtre passe bas, avec une décroissance de 6 dB ou 12 dB par octave dans l'aigu, en fonction des valeurs prises par $Q_a$. Le quotient ouvert est connu pour avoir une influence sur la différence d'énergie des deux premières harmoniques de d'ODG. Pour plus

de détails concernant les influences spectrales de ces paramètres, le lecteur peut se reporter à Henrich (2001) ou à Doval *et al.* (2006).

## 1.2 Les mécanismes vibratoires laryngés

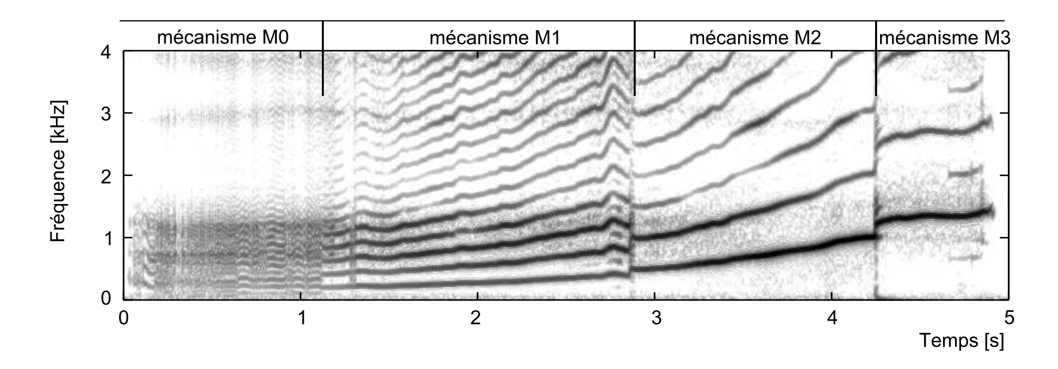



FIG. 1.9 – *Spectrogramme d'un glissando effectué par une femme, couvrant les quatre mécanismes vibratoires laryngés. Adapté de Roubeau* et al. *(2009). (exemple sonore 1)*

Lorsque nous demandons à quelqu'un de produire un glissando des sons les plus graves aux sons les plus aigus (comme présenté figure 1.9), nous entendons plusieurs séquences successives séparées par des discontinuités de la fréquence vibratoire. Ces séquences sont produites par le sujet par quatre configurations vibratoires glottiques différentes, que nous appellerons mécanismes vibratoires laryngés et dénommerons, du grave à l'aigu, mécanisme M0, M1, M2 et M3. Ces mécanismes laryngés sont communs aux chanteurs et non-chanteurs, aux hommes et aux femmes, et même plus généralement à l'ensemble des mammifères (Castellengo *et al.*, 1983).

Le mécanisme M0 permet d'émettre les sons les plus graves de l'ambitus vocal humain. Les cordes vocales sont courtes, épaisses et peu tendues. L'ouverture glottique est très courte (relativement à la période), et la pression sous-glottique est basse. En pratique, la fréquence vibratoire est souvent non maitrisée, sa variation est essentiellement fonction de la pression sous-glottique. À l'opposé, le mécanisme M3 est utilisé pour émettre les sons les plus aigus[1]. Les cordes vocales sont très tendues et allongées. Ce mécanisme a été peu étudié jusqu'à présent (Miller et Schutte, 1993). Nous allons maintenant décrire les mécanismes M1 et M2, qui sont les deux mécanismes laryngés utilisés dans le chant lyrique occidental.

### 1.2.1 Caractérisation des mécanismes M1 et M2

**Caractérisation acoustique**

La figure 1.10 présente un glissando ascendant et descendant effectué par un ténor sur la voyelle /i/. À t = 2.5 s, nous observons sur le spectrogramme une discontinuité similaire à celle de la figure 1.9. Cette discontinuité du spectre sonore correspond également au saut de fréquence vibratoire qui se produit à cet instant, elle correspond à la transition du mécanisme M1 vers le mécanisme M2. Nous constatons que cette transition est accompagnée d'une chute de l'amplitude du signal EGG, ainsi que d'un saut de quotient ouvert qui résulte d'une modification de la forme d'onde du signal EGG. À t = 5.8 s, nous observons le phénomène inverse.

**Caractérisation physiologique**

La chute de l'amplitude du signal EGG traduit une diminution de la surface de contact des cordes vocales. En mécanisme M1, les cordes vocales sont épaisses, et vibrent sur toute leur longueur. La masse vibrante est importante, car le muscle thyro-aryténoïdien participe à la vibration. La figure 1.11 présente un exemple de vibrations de mécanisme M1, où l'ouverture s'effectue progressivement sur l'épaisseur des cordes vocales. Les aryténoïdes peuvent rester

1. Le fait que le M3 soit un mécanisme à part entière distinct du M2 est sujet à caution

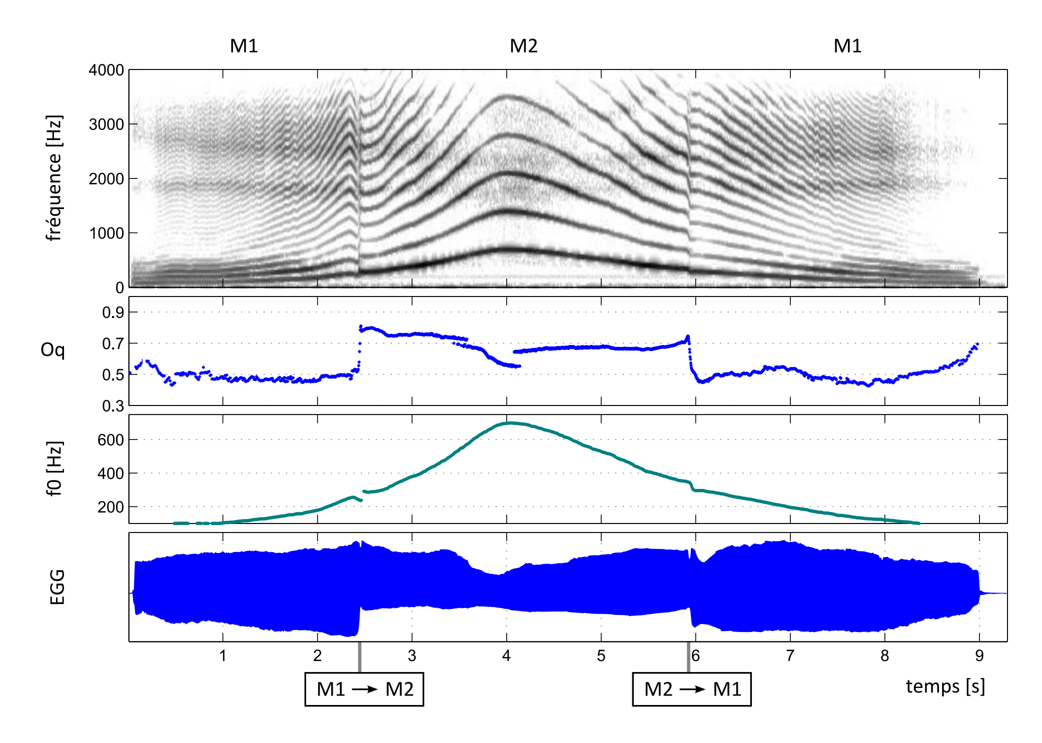



FIG. 1.10 – *Glissando ascendant et descendant effectué par un ténor (T4), marqué par l'utilisation des mécanismes laryngé M1 et M2. Voyelle : /i/. Du haut vers le bas, nous présentons le spectrogramme du son obtenu, la courbe de quotient ouvert ($O_q$), la courbe de fréquence fondamentale et le signal EGG (exemple sonore 2).*

accolés pendant la totalité du cycle ou non. Alors que la fréquence fondamentale augmente, le muscle vocal se contracte, entrainant une augmentation de la raideur des cordes vocales et une diminution de la longueur vibrante. Conjointement, le muscle crico-thyroïdien se contracte légèrement, venant ainsi contrebalancer la diminution de la longueur vibrante des cordes vocales. Cette action antagoniste du muscle vocal et du crico-thyroïdien explique qu'il y ait une limite physiologique du mécanisme M1.

Au moment où le chanteur atteint sa limite physiologique, les cordes vocales subissent un changement de configuration vibratoire. Le muscle vocal se découple de la vibration, et donc, cesse d'osciller, entrainant une modification subite des caractéristiques vibratoires des cordes vocales et le passage en mécanisme M2. Ce découplage est accompagné d'une légère bascule du larynx vers l'avant sous l'effet du muscle crico-thyroïdien (Lacau St Guily et Roubeau, 1994).

Du fait du découplage, en mécanisme M2, le muscle thyro-aryténoïdien ne participe plus à la vibration glottique, ce qui se traduit par une surface de contact des cordes vocales plus faible comme nous pouvons le voir sur la figure 1.11, donc par une amplitude de l'EGG plus faible. L'augmentation de la fréquence fondamentale est alors essentiellement effectuée par la contraction du muscle crico-thyroïdien.

Lors du glissando descendant, il se produit le phénomène inverse. Alors que l'activité du muscle crico-thyroïdien diminue pour permettre une baisse de la fréquence fondamentale, à partir d'une certaine fréquence, la masse vibrante n'est plus suffisante pour entretenir la vibration, le muscle vocal entre alors à nouveau en vibration, marquant le passage du mécanisme M2 au M1.

### 1.2.2 Mécanismes laryngés et pratique vocale

En parole, l'utilisation des mécanismes laryngés dépend du sujet et du contexte. Dans la culture occidentale, les hommes emploient habituellement le mécanisme M1, ainsi que la plupart des femmes. Ces dernières se servent parfois du mécanisme M2 de façon occasionnelle, voire (même si les cas sont de plus en plus rares) systématique. Les mécanismes M0 et M3 sont le plus souvent utilisés dans un contexte précis.

Dans le chant lyrique, les mécanismes M1 et M2 sont les plus utilisés. Les voix de basses,

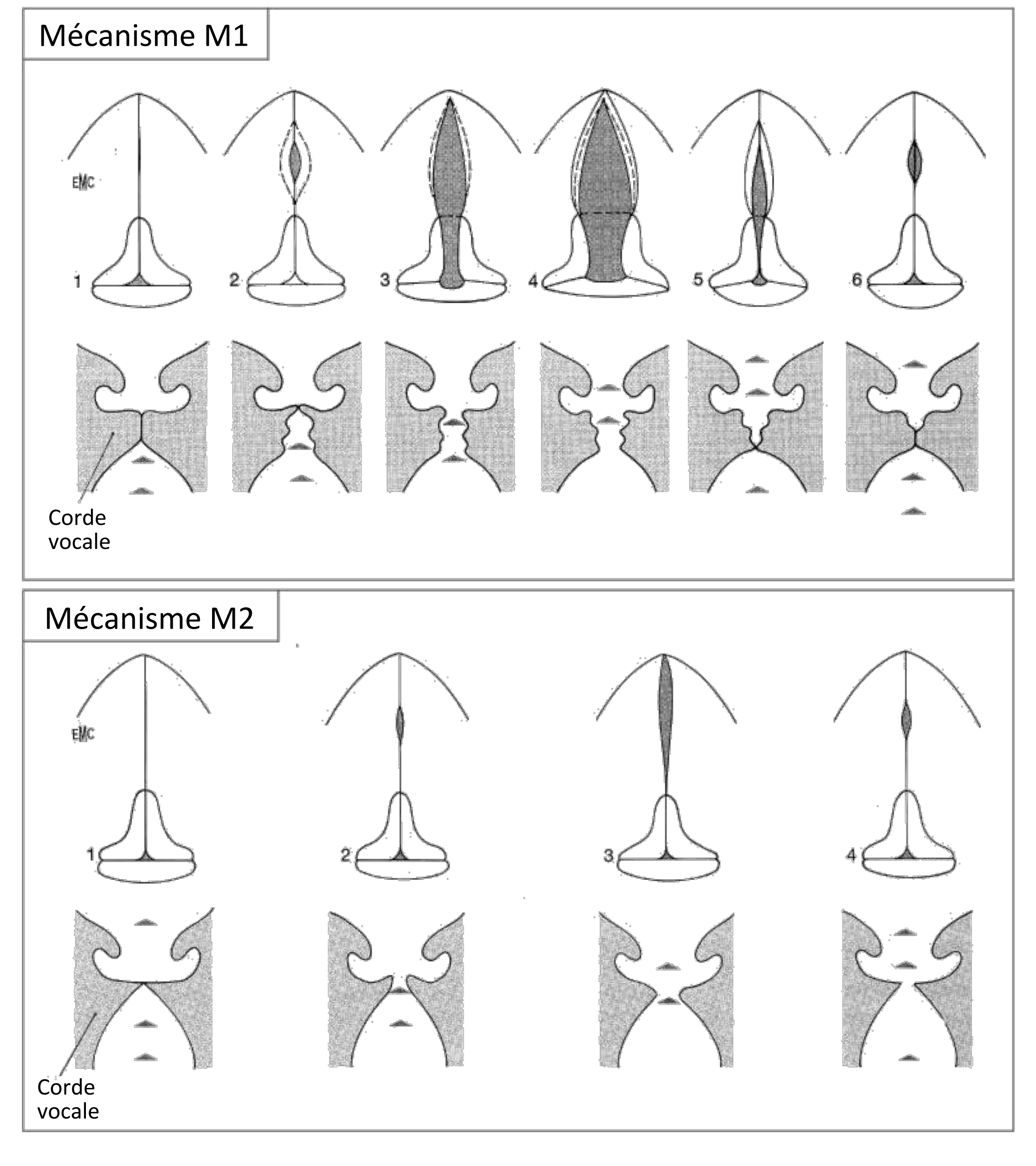



FIG. 1.11 – *Configuration glottique associée aux mécanismes M1 et M2. En mécanisme M1, les cordes vocales sont épaisses et vibrent sur toute leur longueur. En mécanisme M2, elles sont fines et ne vibrent pas toujours sur l'ensemble de leur longueur. D'après Henrich (2001), adapté de Vennard (1967).*

barytons et ténors utilisent habituellement le mécanisme M1 exclusivement. Un des aspects de l'entrainement vocal consiste, pour ces voix, à développer la tessiture disponible dans le mécanisme M1. Les voix de haute-contres ou de contre-ténors, de falsettistes, utilisent principalement le mécanisme M2. Elles peuvent utiliser le mécanisme M1 dans le grave de leur tessiture, mais cette utilisation dépend des chanteurs.

Toujours dans le cadre de la technique lyrique, les femmes chantent principalement en mécanisme M2. Les mezzo-sopranos peuvent néanmoins utiliser le mécanisme M1, dans le grave de leur tessiture, ainsi que les sopranos (dans une moindre mesure). Enfin, les voix graves, les contre-altos, utilisent les deux mécanismes laryngés.

En termes de mécanisme laryngé, l'entrainement vocal est donc différent en fonction de la tessiture du chanteur : certains chanteurs, essentiellement les hommes, cherchent à développer au maximum un mécanisme laryngé, alors que les voix hautes (contre-ténors, voix de femmes) développent essentiellement le mécanisme M2, mais une partie de leur entrainement vocal porte sur la transition entre les mécanismes M1 et M2. Dans la suite du manuscrit, nous parlerons de chanteurs de mécanisme M1 pour désigner les basses, barytons et ténors, et de chanteurs de mécanisme M2 pour désigner les voix de femmes et les contre-ténors. Ces derniers travaillent également la transition M1-M2.

### 1.2.3 La zone commune aux mécanismes M1 et M2

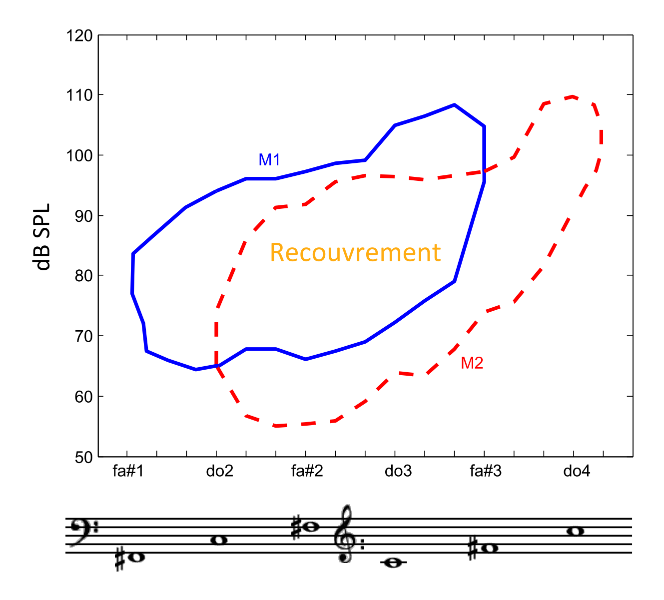



FIG. 1.12 – *Phonétogrammes par mécanismes laryngés d'un contre ténor (CT1). Voyelle : /a/.*

Lorsque nous explorons la dynamique vocale d'un chanteur sur toute sa tessiture en séparant les mécanismes laryngés M1 et M2, nous obtenons un phonétogramme (voir chapitre 3) par mécanisme (figure 1.12). Les deux diagrammes ne sont pas disjoints : le chanteur dispose d'une large étendue fréquentielle commune aux deux mécanismes laryngés. Nous appellerons cette étendue «zone de recouvrement» ou «zone commune», elle nous permet de comparer des productions vocales de M1 et de M2 à hauteur et intensité identiques. Cette zone commune peut être observée chez n'importe quel sujet. Elle est localisée dans la même région fréquentielle chez les hommes et chez les femmes (Roubeau *et al.*, 2004).

#### La voix mixte

La zone de recouvrement des mécanismes revêt à nos yeux un intérêt particulier dans la mesure où elle permet aux chanteurs d'effectuer une transition de mécanisme à l'intérieur d'une plage de fréquence donnée et non sur une note fixe. Dans cette zone, les chanteurs développent un registre[2] particulier, appelé voix mixte (ou medium, middle voice) pour passer d'un mécanisme à

2. Nous reviendrons sur la définition du terme «registre» en partie 1.2.5.

l'autre ou pour imiter le timbre vocal résultant de l'utilisation d'un mécanisme tout en chantant dans l'autre. Cette pratique est particulièrement importante pour les chanteurs utilisant les deux mécanismes, compte tenu des exigences esthétiques musicales actuelles, consistant entre autres pour un chanteur à être capable de parcourir toute sa tessiture sans laisser entendre de transition brutale.

Ce registre est appelé voix mixte, et a fait l'objet de plusieurs études au Laboratoire d'Acoustique Musicale (Chuberre, 2000; Expert, 2003, 2007; Castellengo *et al.*, 2004; Lamesch, 2006). Ces études ont établi que :

- la voix mixte est un registre situé dans la zone de recouvrement des mécanismes laryngés M1 et M2 en termes de hauteur et d'intensité.
- la voix mixte peut être émise en M1 ou en M2, mais le mixage n'est pas effectué au niveau laryngé. La vibration glottique subit des adaptations en restant soit en M1, soit en M2.

(Castellengo *et al.*, 2007; Lamesch *et al.*, 2007) ont montré que des chanteurs maîtrisant parfaitement la voix mixte étaient ainsi capables d'obtenir des spectres similaires en M1 et en M2, et qu'il était très difficile, à l'oreille, d'identifier le mécanisme laryngé utilisé. Ces chanteurs sont donc capables d'obtenir un timbre vocal très similaire en utilisant deux vibrations glottiques différentes.

### 1.2.4 Comment identifie-t-on les mécanismes laryngés ?

De manière générale et pour une oreille entrainée, les mécanismes laryngés sont reconnaissables à l'oreille chez la plupart des chanteurs (entrainés et non-entrainés). Le mécanisme M0 est caractérisable par un son instable et grave; et le mécanisme M3 par un son extrêmement aigu. Pour distinguer les mécanismes M1 et M2, le premier indice est le timbre de la voix, associé à la fréquence fondamentale. Mais pour s'assurer que le chanteur est effectivement en M1 ou en M2, la forme d'onde de l'EGG ainsi que la valeur du quotient ouvert sont des indicateurs fiables, surtout lorsqu'elles sont observées lors des transitions.

Lorsque l'identification du mécanisme laryngé est délicate, par exemple pour un chanteur professionnel dans sa zone de voix mixte, l'identification du mécanisme laryngé est possible en lui demandant d'effectuer un crescendo ou un decrescendo pour le faire sortir de sa zone de recouvrement de mécanismes, puis de lui demander de changer de mécanisme en augmentant ou diminuant la fréquence d'émission. Il se produit alors la transition de mécanisme caractérisable à la fois acoustiquement par le saut de fréquence, et à partir du signal EGG avec la variation d'amplitude du signal EGG ainsi que du quotient ouvert.

Ajoutons que la plupart des chanteurs sont ou peuvent être, dans la plus grande partie de leur tessiture, conscient du mécanisme qu'ils utilisent. C'est dans la zone de recouvrement et pour des nuances piano que l'identification, chez certains chanteurs, peut s'avérer la plus difficile.

L'ensemble de ces indications nous permet, dans la plus grande majorité des productions effectuées avec enregistrement simultané du signal EGG, d'identifier le mécanisme laryngé utilisé. Néanmoins il n'existe pas de critère permettant d'identifier avec une certitude absolue et dans 100 % des cas le mécanisme utilisé. La raison principale est que chaque chanteur gère sa voix à sa façon, et cela se manifeste par exemple sur les valeurs que prend le quotient ouvert en M1 et en M2, sur sa corrélation avec l'intensité, la fréquence, en M1 et en M2.

### 1.2.5 Mécanismes laryngés ou registres ?

L'utilisation de la terminologie des mécanismes laryngés n'est pas répendue au sein de la communauté scientifique internationale. La plupart des chercheurs utilise la terminologie des registres.

Le terme «registre» provient du milieu musical. La mention la plus ancienne du terme «registre» en référence à la voix que nous avons trouvée figure dans la méthode du conservatoire (Mengozzi, 1803, p. 2) :

> *Nous tenons le mot REGISTRE des italiens. Ceux-ci entendent par ce mot un certain nombre de sons de la voix, dont le caractère diffère du caractère d'un autre nombre de*

*sons, lesquels forment un autre registre. [...] Les italiens appellent aussi Registre ce que les français nomment Jeu de l'Orgue. Ce mot peut aider à définir et à comprendre le premier, si l'on observe que la qualité du son des tuyaux de l'orgue compris dans ce jeu, est différente de la qualité des sons des tuyaux compris dans un autre jeu.*

Selon cette définition, les registres sont basés sur des différences de qualité de sons ou de caractère. Dans le domaine musical, cette définition du terme «registre» est toujours actuelle. Citons la définition du chanteur Richard Miller (1990) que nous prendrons comme référence. Selon lui, un registre correspond à *une série de sons vocaux consécutifs de timbre homogène, distincte de séries voisines*. Le nombre de registres a varié dans le temps, n'est pas le même dans toutes les cultures (même occidentales), de sorte qu'il règne une certaine confusion autour de ce concept. Les scientifiques y ont consacré de nombreuses études, et ils sont un des points les plus importants de la technique vocale. La difficulté principale est de définir objectivement un concept et une terminologie qui demeurent non consensuels (à l'échelle internationale) dans le milieu musical d'où il est issu.

Néanmoins, dans le domaine scientifique, la définition du terme «registre» demeure problématique (Henrich, 2006). De nombreuses études ont cherché à appuyer la définition des registres sur une base physiologique. Une synthèse de ces travaux est présentée tableau 1.1. L'un des premiers est Garcia, qui dans la définition qu'il donne des registres, écrit explicitement qu'il souhaite traiter de la mécanique vibratoire des cordes vocales (Castellengo, 2005). Dans ces conditions, les registres peuvent s'apparenter aux mécanismes laryngés. Mais ils peuvent aussi être contradictoires avec l'expérience des chanteurs, c'est d'ailleurs ce qui est arrivé à Garcia qui a ensuite réintroduit un troisième registre aux deux qu'il avait observé. D'autres chercheurs (Titze, 1988; Sakakibara, 2003) basent leur définition à la fois sur le timbre et sur la physiologie de vibration des cordes vocales.

Aujourd'hui la terminologie la plus employée consiste à parler de registre modal ou de poitrine et de registre falsetto chez l'homme. Ces deux registres, s'ils sont considérés au niveau laryngé, sont synonymes de mécanisme M1 et M2. Chez la femme, un registre mixte est en outre souvent cité, et nous ne pouvons pas a priori l'attribuer au mécanisme M1 ou au M2. Cette terminologie

---

3. Nous n'avons pas nous même étudié les travaux auxquels nous faisons allusion dans ce tableau. Les références utilisées par les auteurs du tableau sont les suivantes:

Müller, J. (1840), *Physiologie du système nerveux ou recherches et expériences sur les diverses classes d'appareils nerveux, les mouvements, la voix, la parole, les sens et les facultés intellectuelles*: Paris: chez Baillère. Deux tomes; traduit de l'allemand sur la 3rd ed. par A. Jourdan.

Garcia, M. (1847), *Mémoire sur la voix humaine*: présenté à l'Académie des Sciences en 1840. 2nd ed. Paris: Imprimerie d'E. Duverger.

Garcia, M. (1855), *Observations on the human voice*: In: Proceedings of the Royal Society of London. London: The Royal Society, 399-410.

Garcia, M. (1861), *Observations physiologiques sur la voix humaine*: Paris: Asselin.

Battaille, C. (1861), *Nouvelles recherches sur la phonation*: Paris: Académie des Sciences, V. Masson.

Behnke, E. (1880), *The Mechanism of the Human Voice*: 12è ed. Warwick Lane, London: J. Curwen & Sons.

Husson, R. et Djian, A. (1952), Tomographie et phonation: *J. Radiol. Electrol.*, 33:127-135.

Van den Berg, J.W., Vennard, W., Burger, D. et Shervanian, C.C. (1960), *Voice production: the vibrating larynx*: Instructional Film. The Netherlands: University of Groningen.

Hirano, M., Vennard, W. et Ohala, J. (1970), Regulation of register, pitch and intensity of voice. An electromyographic investigation of laryngeal intrinsic muscles: *Folia Phoniat.*, 22:1-20.

Hollien, H. (1974), On vocal registers: *J. Phon.*, 2:125-143.

Colton, R.H. (1972), Spectral characteristics of the modal and falsetto registers: *Folia Phoniat.*, 24:337-344.

Colton, R.H. (1973), Vocal intensity in the modal and falsetto registers: *Folia Phoniat.*, 25:62-70.

Large, J., Iwata, S. et Von Leden, H. (1970), The primary female register transition in singing. Aerodynamic study: *Folia Phoniat.*, 22:385-396.

Large, J., Iwata, S. et Von Leden, H. (1972), The male operatic head register versus falsetto: *Folia Phoniat.*, 24:19-29.

Large, J. (1972), Towards an integrated physiologic-acoustic theory of vocal registers: *NATS Bull.*, 29:18-40.

Gay, T., Strome, M., Hirose, H. et Sawashima, M. (1972), Electromyography of the intrinsic laryngeal muscles during phonation: *Ann. Otol. Rhinol. Laryngol.*, 81:401-409.

Lecluse, F.L.E. (1977), *Elektroglottografie*: thése de doctorat, Utrecht, Rotterdam: Drukkerij Elinkwijk.

Van Deinse, J.B. (1981), Registers: *Folia Phoniat.*, 33:37-50.

Kitzing, P. (1982), Photo- and electroglottographical recording of the laryngeal vibratory pattern during different registers: *Folia Phoniat.*, 34:234-241.

| Auteur [3] | année | sujets | protocole vocal | Méthode d'observation | Registres |
|---|---|---|---|---|---|
| Müller | 1840 | Larynx humain excisé (hommes) | notes tenues, glissandos | Observation directe avec variations de tension | 2 (Chest et falsetto) |
| Garcia | 1840 | hommes et femmes | notes tenues | soutien respiratoire | 2 pour les voix d'hommes et de femmes (poitrine et fausset-tête) |
| | 1855 | hommes et femmes | notes tenues | Laryngoscopie | 3 (Poitrine, fausset et tête) |
| Battaille | 1861 | non précisé | notes tenues | Laryngoscopie | 2 (Poitrine et fausset) |
| Benhke | 1880 | hommes et femmes | notes tenues | Laryngoscopie | 2 pour les voix d'hommes (thick et, thin), 3 pour les voix de femmes (thick,thin, et small) |
| Husson et Djian | 1952 | hommes et femmes, chanteurs | notes tenues | Tomographie | 2 pour les voix d'hommes et de femmes (first et second registers) |
| Van den Berg | 1960 | Larynx humain excisé (hommes) | | Observation directe | |
| Hirano *et al* | 1970 | hommes et femmes : 2 pour chaque genre | notes tenues et gammes | EMG | 3 pour les voix d'hommes et de femmes : Chest, mid, head (hommes) ; Chest, head, et falsetto (femmes) |
| Hollien | 1974 | hommes | notes tenues | Perception, acoustique, rayons X, débit d'air | 3 (Pulse, modal, et loft) |
| Colton | 1972, 1973 | hommes : chanteurs et non-chanteurs | notes tenues | Acoustique et perception | 2 (Modal et falsetto) |
| Large *et al* | 1970, 1972 | hommes et femmes | sons isoparamétriques | Débit d'air | 3 pour les voix d'hommes (chest, head, et falsetto) 2 pour les voix de femmes (chest et middle) |
| Gay *et al* | 1972 | hommes et femmes | notes tenues | Électromyographie | 2 (Chest, falsetto) |
| Lecluse | 1977 | hommes | notes tenues | Électroglottographie | 2 (Chest, falsetto) |
| Van Deinse | 1981 | hommes et femmes | notes tenues | Électromyographie | 2 pour les voix d'hommes (chest, falsetto), 4 pour les voix de femmes (chest, head, little, et whistle) |
| Kitzing | 1982 | hommes (1 entrainé, 1 non-entrainé) | notes tenues, glissandos et gammes | EGG et photo-glottographie | 2 pour le chanteur entrainé (Chest et head), 2 pour le chanteur non-entrainé (chest et falsetto) |

TAB. 1.1 – *Résumé des principales études effectuées sur les registres. Tableau traduit de Roubeau* et al. *(2009).*

présente en outre le défaut d'introduire une différence entre les hommes et les femmes, qui est d'ordre culturel et non physiologique. Il arrive également de lire, notamment dans des travaux portant spécifiquement sur la voix chantée, la présence d'une voix mixte chez l'homme... qui peut être parfois comprise de différentes manières (nous avons fait l'expérience au cours de notre travail de thèse que le terme n'a pas le même sens en Allemagne et en France).

Ces différentes définitions amènent une multitude de termes dont il est parfois difficile de comprendre à quoi ils se réfèrent. Mörner *et al.* (1963) en ont recensé plus d'une centaine, essentiellement de langue italienne, française, anglaise et allemande.

**Notre position terminologique**

Selon nous, la position adoptée par Sakakibara traduit une vision des registres relevant plus du sens commun que d'une expertise de la voix chantée, puisqu'elle ne tient pas en compte la capacité des chanteurs experts de produire un timbre vocal similaire en M1 et en M2 (ce qui est accompli dans le registre de voix mixte).

Pour ne pas entrer dans un discours confus et polémique, nous avons choisi, dans la continuité des études menées au Laboratoire d'Acoustique Musicale par Roubeau, Castellengo et Henrich, d'utiliser la terminologie (neutre) des mécanismes laryngés pour décrire la vibration des cordes vocales, et d'utiliser le terme de registre pour nous référer au timbre de la voix. Nous choisissons ainsi de laisser au terme «registre» le sens premier qui vient du milieu musical.

Comme nous le verrons tout au long de notre travail, ce choix pose des difficultés de compréhension des publications internationales qui utilisent la terminologie des registres sans préciser à quel niveau les auteurs se situent. Dans la plupart des cas, nous pouvons implicitement comprendre si la terminologie est utilisée en référence à la vibration laryngée ou au timbre de la voix, mais il s'agit d'une interprétation qui est la nôtre et non celle des auteurs. Pour cela, dans la suite de notre travail, quand nous nous référons à ce genre d'article, nous citerons la terminologie utilisée par les auteurs, ainsi que notre façon de la comprendre. Nous introduisons ainsi un peu de lourdeur dans notre manuscrit, mais nous pensons que cette lourdeur est gage de clarté conceptuelle et de respect des termes que les auteurs que nous citons ont utilisé.

## 1.3 Le conduit vocal et les voyelles

Après avoir décrit en détails la physiologie du larynx, son fonctionnement, les mécanismes laryngés, nous allons maintenant décrire le niveau résonantiel. Le son généré au niveau de la glotte sous l'impulsion de la pression sous-glottique se propage dans l'ensemble du conduit vocal. Celui-ci agit alors comme un tuyau dans lequel se propage une onde acoustique : il modifie la répartition de l'énergie dans le spectre en fonction de ses caractéristiques géométriques. Dans la parole et le chant, les sujets ont la possibilité de modifier la forme du conduit vocal, ce qui leur permet d'articuler les sons, de produire les différents phonèmes des langues. Nous nous intéresserons aux voyelles, qui dans le cas du chant, correspondent aux sons entretenus (alors que la plupart des consonnes ont un aspect plus transitoire). Pour produire les différentes voyelles, la position de la langue est un des paramètres cruciaux (voir par exemple figure 1.13, image de droite). Le palais mou permet également d'ouvrir ou de fermer le conduit nasal, donc de produire les voyelles nasales.

La figure 1.14 présente le spectrogramme d'un son tenu, marqué par plusieurs changements de voyelles. Nous y constatons des traces foncées correspondant à des zones spectrales dont l'énergie est renforcée, et dont la fréquence varie avec les voyelles. Ces renforcements sont appelées formants. Il est possible de définir une infinité de formants, mais en pratique les plus pertinents pour la reconnaissance de la parole sont les trois premiers (F1, F2 et F3). La fréquence de ces formants varie en fonction de la forme du conduit vocal (et notamment de la position de la langue).

Les voyelles sont représentées dans un plan F1-F2 (triangle vocalique), comme c'est le cas figure 1.13. Les trois voyelles cardinales sont /a/, /i/ et /u/. Chaque voyelle correspond à une zone du plan plutôt qu'à un point. Par ailleurs, nous pouvons constater que certaines régions

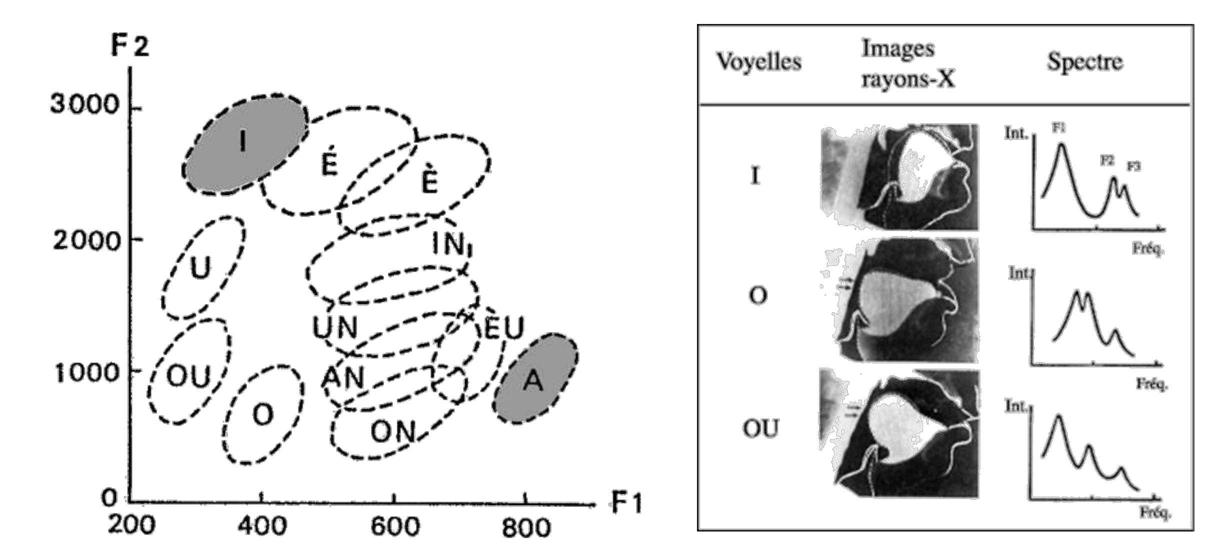



FIG. 1.13 – *Gauche : exemple de triangle vocalique des voyelles du français. Droite : mise en relation de la forme du conduit vocal avec les fréquences formantiques. D'après Appelman (1967).*

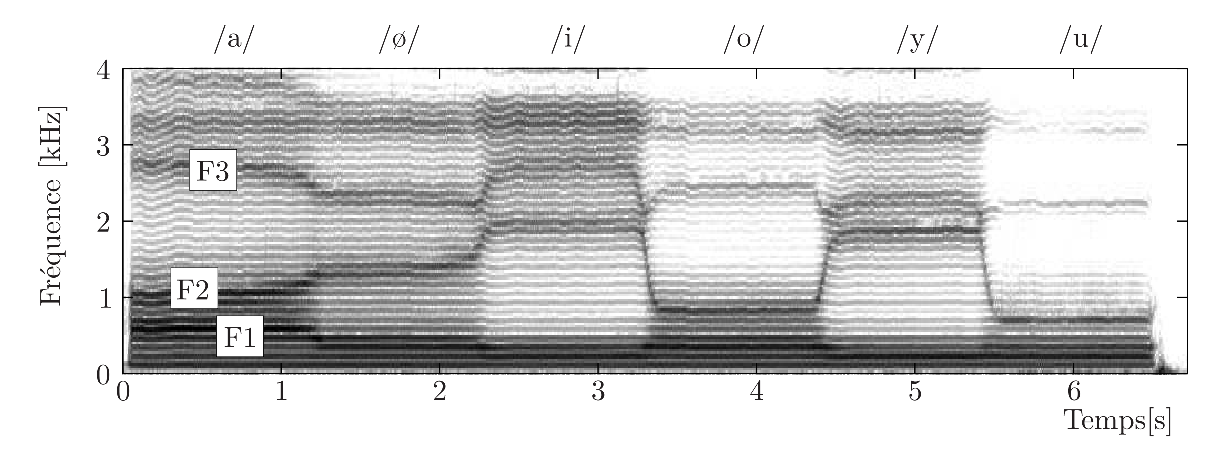



FIG. 1.14 – *Spectrogramme d'un son tenu ($f0 = 118Hz$), chanté par un ténor (T3), avec plusieurs changements de voyelles (exemple sonore 3).*

peuvent être attribuées à plusieurs voyelles, en fonction du contexte ou de la fréquence du troisième formant.

La relation entre formants et voyelle dépend du sujet. L'ensemble du triangle vocalique est modifié en fonction des dimensions géométriques du conduit vocal, ce qui explique que les fréquences des deux premiers formants sont plus basses pour les hommes que pour les femmes et pour les enfants.

### 1.3.1 Observation et modélisation du conduit vocal

L'essentiel des études portant sur le conduit vocal a pour objectif de décrire sa forme générale ou la fonction de transfert acoustique qui en résulte. Pour cela, différentes méthodes d'imagerie ont été utilisées. Dans un premier temps, les imageries par rayon X ont beaucoup été utilisées. Cette méthode permettait de visualiser les contours du conduit vocal, depuis le larynx jusqu'aux extrémités buccale ou nasale. Aujourd'hui il n'est plus possible de s'en servir à des fins de recherche pour des raisons sanitaires.

Les plupart des études récentes utilisent l'imagerie par résonance magnétique. Cette méthode permet d'obtenir des coupes sagittales du conduit vocal très précises, ou même une reconstruction en 3 dimensions du conduit vocal (à condition d'augmenter le temps d'exposition et de disposer du dispositif expérimental adapté). Elle permet d'effectuer des observations précises et relativement complètes de la forme du conduit vocal, sans risque connu pour le sujet. Les principaux inconvénients sont d'une part le temps d'exposition (plusieurs secondes) pour obtenir une reconstruction en 3 dimensions, et d'autre part, le fait que l'IRM ne détecte pas les os (donc les dents), ce qui nécessite de les ajouter sur les images enregistrées. Pour une description plus détaillée et une revue bibliographique de l'utilisation de ces appareils pour la parole, le lecteur pourra se référer à Story *et al.* (1996).

Nous n'avons pas utilisé ce genre de méthode d'investigation dans le cadre de notre étude, car elles nécessitent un appareillage très lourd, et très contraignant pour le chanteur. Celui-ci doit accepter de chanter allongé et dans une ambiance sonore particulièrement désagréable. Certains scanners IRM, de type fermés, englobent complètement la tête du sujet, ce qui peut évidemment modifier considérablement la perception de sa voix. En bref, ce matériel n'est pas compatible avec des mesures acoustiques fines ou nécessite une grande expertise de la part du chanteur pour faire au maximum abstraction des contraintes expérimentales.

#### Un modèle acoustique résultant

La représentation acoustique du conduit vocal la plus utilisée est celle d'un guide d'onde, dans lequel se propage l'onde acoustique générée au niveau laryngé. Certaines propriétés acoustiques découlent directement de la géométrie du guide, qu'il est possible d'établir ou d'approximer à partir d'images de conduit vocal, soit en 2 dimensions (coupes médio-sagittales), soit en 3 dimensions, ce qui permet évidemment une meilleure précision. La démarche expérimentale est schématisée figure 1.15.

Dans un premier temps, une représentation du conduit vocal est établie à partir d'une succession de cylindres de longueur fixe et de section variable. Le nombre de cylindres est variable en fonction de la précision souhaitée ou possible. Les données de première importance sont les sections des différents cylindres en fonction de la distance à la glotte. Elles sont représentées sur un graphique appelé fonction d'aire (cf. figure 1.15 (b)). Les lois de l'acoustique générale permettent alors d'établir la fonction de transfert du système(voir par exemple Story, 2004).

### 1.3.2 Mesures des résonances du conduit vocal

Une autre technique d'investigation beaucoup moins lourde est utilisée pour étudier le conduit vocal. Le principe consiste à disposer une source de débit acoustique au niveau de la bouche du chanteur et d'injecter dans son conduit vocal un signal large bande dont les fréquences sont rapprochés (moins de 10 Hz), pendant que celui-ci produit un son tenu. Un microphone placé au niveau de la bouche du chanteur enregistre alors le signal provenant du conduit vocal

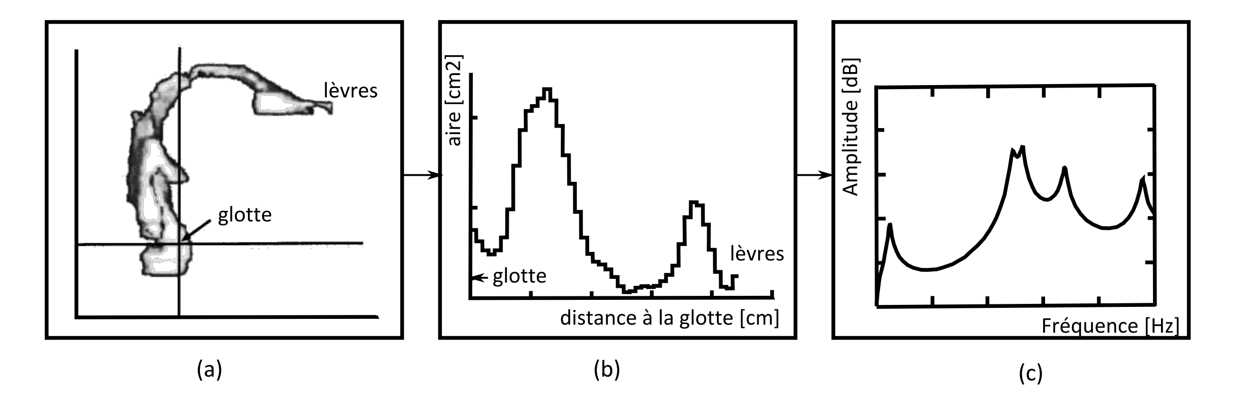



Fig. 1.15 – *Schématisation des trois étapes principales dans la modélisation du conduit vocal. Figures adaptées de Story* et al. *(2001).*

(constitué de la production vocale et du signal synthétique injecté dans le conduit vocal) et rayonné dans le milieu extérieur. La calibration de l'appareil permet de prendre en compte les effets de rayonnement, pour in fine, fournir un son sur le spectre duquel il est possible de relever les fréquences de résonances du conduit vocal. Une description plus détaillée a été publiée par Epps *et al.* (1997b,a).

Cette méthode est très intéressante car elle permet de mesurer avec précision les résonnances du conduit vocal, donc de rendre compte d'ajustements résonantiels fins, quelle que soit la fréquence du signal glottique. Nous verrons un exemple d'utilisation de cette technique dans la partie 1.4.2. Par rapport à l'imagerie, elle a le désavantage de ne fournir que les fréquences de résonances et non la totalité de la fonction de transfert du conduit vocal.

Une autre méthode, encore plus simple au niveau de l'instrumentation, consiste à demander au chanteur d'effectuer un bruit juste avant ou après la production vocale, en lui demandant de garder identique la forme du conduit vocal. Ce bruit peut consister en du M0, du souffle, il peut être également effectué lors de la phase inspiratoire (*ingressive voice*). La fiabilité de la mesure repose alors sur l'aptitude du chanteur à garder effectivement la forme de son conduit vocal et la position verticale du larynx identiques sur la production voisée et sur celle bruitée. Miller *et al.* (1997) considèrent que ces méthodes sont fiables dans la mesure où le sujet est entrainé et dans la mesure des productions qu'ils ont étudiées (une voix d'homme, à une hauteur confortable). L'estimation formantique effectuée sur du M0 a également été utilisée par Chuberre (2000).

## 1.4 Voyelles et vibrations laryngées dans le chant

Après avoir étudié séparément les aspects laryngés et résonantiels, nous présentons les descriptions prenant en compte ces deux étages. Nous commencerons par décrire schématiquement le modèle source-filtre linéaire. Nous verrons ensuite une description mécanique faisant intervenir des interactions source-filtre.

### 1.4.1 Le modèle source-filtre linéaire

Le principe de base du modèle source-filtre est schématisé figure 1.16. Un signal glottique, l'onde de débit glottique (ODG), est convolué par un filtre décrivant le conduit vocal, le résultat étant lui-même convolué à un autre filtre décrivant le rayonnement aux lèvres. Ce dernier est souvent approximé à une dérivation (Flanagan, 1965). Dans le cadre de ce modèle, le filtre n'a donc aucune influence sur le signal de source. En première approximation cette hypothèse est assez cohérente, au moins dans le domaine de la parole où il a permis de nombreuses avancées.

**Technique d'analyse basée sur le modèle source-filtre**

De nombreuses techniques existent, permettant de séparer la source du filtre. La technique la

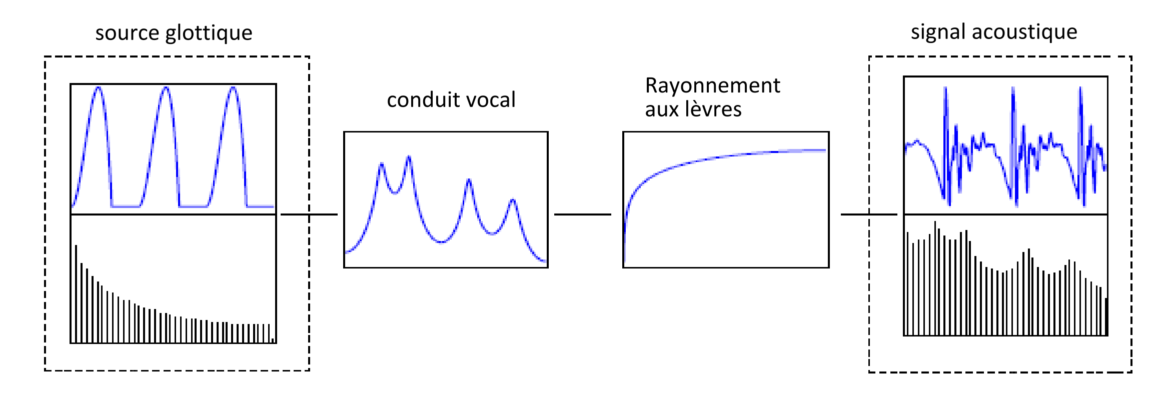



Fig. 1.16 – *Schématisation du modèle source-filtre. Adapté de Henrich (2001).*

plus utilisée est le filtrage inverse. Pour cela, le filtre est souvent estimé par LPC (codage par prédiction linéaire, cf. Makhoul, 1975).

Le principe consiste à déterminer le filtre auto-régressif du conduit vocal par la méthode des moindres carrés. Le connaissant, il suffit d'appliquer au signal rayonné le filtre inverse de celui obtenu pour obtenir l'ODG dérivée. Dans ce cadre là, les formants, définis comme les maximas de l'enveloppe spectrale dans la partie 1.3, peuvent être décrits comme des pôles de la fonction de transfert modélisant le conduit vocal, ou encore par une fréquence, une amplitude et une largeur de bande.

Dans le domaine du traitement du signal, la théorie source-filtre linéaire a été abondamment développée (Fant, 1970) et a permis des innovations technologiques majeures dans le domaine du traitement de la parole. En revanche, ce mode d'analyse est mal adapté au chant pour plusieurs raisons. La première est que la LPC nécessite un échantillonnage spectral suffisant. Cela signifie que s'il n'y a pas d'harmonique dans la largeur de bande d'un formant, ce dernier ne pourra pas être détecté. Cette situation est assez fréquemment rencontrée dans le chant, lorsque la fréquence fondamentale est assez aigüe. En conséquence, le filtrage inverse est une méthode mal adaptée aux voix de femme, ou aux productions de mécanisme M2. Le deuxième inconvénient de la méthode est précisément de supposer une absence d'interaction entre la source et le filtre. Il n'est pas avéré que cette hypothèse soit valide dans le chant, comme nous allons le voir dans le chapitre suivant.

### 1.4.2 Les interactions source-filtre

La linéarité du modèle source-filtre pose question depuis lontemps (Flanagan, 1968). Childers et Wong (1994) ont effectué une revue bibliographique des interactions étudiées dans la littérature. Ils ont par exemple relevé que la forme du conduit vocal avait une influence sur le coefficient d'asymétrie de l'onde de débit glottique. Fant et Lin (1987) ou Titze (2004) ont confirmé ces constatations portant sur le coefficient d'asymétrie. Titze (2004) a établi une influence de la forme du conduit vocal sur le paramètre d'excitation maximale (appelée le MFDR, *Maximum Flow Declination Rate*).

Récemment, Titze (2008) a proposé un modèle physique permettant d'expliciter plusieurs phénomènes d'interactions source-filtre. Le raisonnement est fondé sur l'équilibre des pressions qui doit être effectué au niveau glottique :

$$P_{sous-glottique} + P_{supra-glottique} + P_{trans-glottique} = 0$$

Les pressions sous- et supra-glottiques peuvent être exprimées en fonction de la géométrie des deux conduits. Il est ainsi possible d'obtenir une expression de l'impédance trans-glottique, et de décrire, par exemple, quelles régions fréquentielles sont plus ou moins favorables à la vibration glottique. Pour notre propos, l'intérêt de cette démarche réside dans le fait qu'il est possible de modéliser l'influence de la forme du conduit vocal (donc de la voyelle) sur l'onde de débit glottique.

**Le formant tuning**

Titze (2008) montre que la vibration glottique est favorisée quand la fréquence fondamentale se trouve dans une région fréquentielle dont la réactance (la partie imaginaire de l'impédance) est positive (ou inductive). Cette situation est réalisée en particulier quand un des harmoniques (souvent le premier) se trouve juste en dessous de la fréquence du premier formant.

Dans le cadre de la théorie source-filtre linéaire, la fréquence fondamentale (glottique) est supposée indépendante des fréquences formantiques. Différentes observations (Sundberg, 1975; Miller, 2000) ont néanmoins mis en évidence que ce n'était pas le cas, et plus récemment la mesure directe des fréquences de résonance du conduit vocal (Joliveau *et al.*, 2004b,a; Smith *et al.*, 2007) ont confirmé ces observations : les chanteurs positionnent effectivement leurs formants (essentiellement les deux premiers) juste au dessus d'un harmonique. Selon Sundberg, ces ajustements sont effectués au niveau de l'ouverture de la bouche (Sundberg et Skoog, 1997). Ce phénomène est appelé «formant tuning». Il est particulièrement important pour les voix aigües (sopranos). En effet à haute fréquence fondamentale les harmoniques sont très éloignées les unes des autres, donc les ajustements à effectuer sont très importants.

Acoustiquement parlant, le «formant tuning» permet au chanteur de gagner de l'énergie acoustique. Titze (2008) a donc explicité, en outre, pourquoi cette situation était favorable à la vibration glottique. Néanmoins, si l'on considère maintenant la vibration glottique en termes de mécanismes laryngés, l'influence du conduit vocal sur la source n'a pas de raison d'être différente en M1 et en M2... L'influence de ce formant tuning sur la production laryngée est-elle la même en mécanisme M1 et en mécanisme M2 ?

**Quelle influence en fonction du mécanisme laryngé ?**

La plupart des études portant sur ces interactions s'inscrit dans le domaine de la parole, et décrit un modèle d'onde de débit glottique de type M1. Titze (2008) a proposé quelques éléments de réponse en décrivant les différences de mécanismes laryngés (dénommés registres modal et falsetto) à partir de la géométrie des cordes vocales : en registre modal, la glotte est convergente lors de l'ouverture et divergente ensuite, alors qu'en falsetto, elle reste divergente. L'auteur explique que les conduits sous-glottique et supra-glottique peuvent être chacun inductif (réactance positive) ou capacitif (réactance négative), ce qui fait quatre configurations possibles dont il discute l'adéquation avec les deux géométries glottiques proposées. Il montre qu'un conduit vocal inductif peut être favorable au falsetto comme au registre modal. Le conduit sous-glottique inductif et le supra-glottique capacitif est la pire situation pour le registre modal, or elle est rencontrée par exemple quand la fréquence fondamentale est au dessus de la fréquence du premier formant. Dans ces conditions, le système peut alors basculer vers le falsetto pour lequel cette situation est moins défavorable.

## 1.5 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons décrit l'anatomie du larynx, sa physiologie, les modèles descriptifs principalement utilisés, les méthodes exploratoires. Nous avons vu que le larynx peut vibrer selon quatre mécanismes, dont deux sont principalement utilisés en chant lyrique. Les voyelles sont générées au niveau du conduit supraglottique.

Bien que certains aspects des interactions source-filtre soient déjà connus, peu d'auteurs ont exploré si l'influence du filtre est la même en M1 et en M2. Titze (2008) a montré qu'une simple différence de géométrie des cordes vocales entre les mécanismes M1 et M2 (dénommés registre modal et falsetto dans la publication) pouvait expliquer que les voyelles dont le premier formant est bas, sont plus favorables au mécanisme M2 qu'au M1 quand la fréquence de vibration dépasse celle du premier formant. Dans le même temps, cette situation est rarement rencontrée dans la mesure où les chanteurs adaptent les fréquences formantiques à la fréquence vibratoire (formant tuning). Le propos de notre thèse est de chercher à observer si les voyelles ont la même influence sur certains paramètres, en M1 et en M2. Nous avons choisi de travailler sur la dynamique vocale, sur différents paramètres glottiques et spectraux, sur les transitions de

mécanismes. Dans la conclusion générale de l'étude, nous verrons si nous pouvons tirer de notre étude un modèle général de compréhension des phénomènes observés.

Mais auparavant, nous souhaitons donner la parole aux chanteurs. Quelle expérience ou connaissance ont-ils par rapport à la gestion des voyelles dans les différents mécanismes laryngés ?

# Chapitre 2

# L'approche des chanteurs

L'approche que les chanteurs ont de leur voix est différente de celle développée dans le milieu scientifique : les chanteurs l'inscrivent dans une pratique.

L'essentiel du travail d'apprentissage du chant pourrait être décrit comme un travail d'approche et d'affinement des sensations corporelles et auditives que le chanteur expérimente en chantant, pour arriver à satisfaire aux exigences vocales de son style musical avec la plus grande liberté d'interprétation possible. Une des principales difficultés des professeurs de chant est donc de trouver un moyen pour donner à l'élève la possibilité de se guider lui-même à partir de ses propres sensations, que le professeur ne peut percevoir ou dont il ne peut avoir l'intuition qu'à partir de sa propre expérience. Pour cela, élève et professeur doivent entre autres élaborer un langage commun.

Pour décrire avec précision un certain aspect de la voix, les sciences naturelles adoptent habituellement une approche analytique : elles se focalisent sur un aspect précis, qu'il soit de nature physiologique ou acoustique. Elles décrivent donc la voix chantée à travers une multitude de paramètres, corrélés ou non entre eux. Le chanteur a une approche beaucoup plus globale : il se doit toujours, s'il modifie un élément, d'effectuer un ajustement ailleurs pour conserver un «équilibre vocal». Cette notion d'équilibre est par exemple tout à fait explicitée par certains pédagogues parlant par exemple d'accord phono-résonantiel (Ormezzano, 2000), d'appogio (Miller, 1990), ou de façon encore plus générale, d'accord pneumo-phono-résonantiel (Tarneaud, 1961). Cette diversité d'approches a pour nous une conséquence tout à fait directe sur notre propos : si les chercheurs et chanteurs n'ont pas la même approche, et même, ne visent pas le même objet d'étude, alors le passage d'un champ disciplinaire à l'autre est une tâche délicate, que nous nous devons d'effectuer avec beaucoup de prudence, en précisant quelles descriptions relèvent de quel champ d'investigation chaque fois que cela est nécessaire.

Nous allons, dans un premier temps, décrire un aspect de ce passage d'un champ disciplinaire à l'autre, à savoir les relations entre mécanismes laryngés et registres. Ensuite, nous établirons comment l'expertise des chanteurs et professeurs de chant se positionne par rapport aux relations entre mécanisme et voyelles. Enfin, nous présenterons la façon dont les chanteurs perçoivent les différents mécanismes et s'ils ont conscience d'une relation entre mécanismes et voyelle. Pour cela nous avons interrogé des chanteurs sur leur expérience. Nous présenterons donc les méthodes d'analyses mises en place, puis les résultats.

**Mécanismes ou registres ?**

Nous avons décrit dans la partie 1.2 le concept physique de mécanisme laryngé, basé sur une description physiologique et acoustique. Comme nous l'avons souligné, ce concept a été développé dans un cadre scientifique et est appuyé sur des considérations acoustiques et physiologiques. Il est peu utilisé par les chanteurs qui emploient la terminologie des registres.

Comme nous l'avons souligné (partie 1.2.5), les registres renvoient à des considérations de timbre. Pour produire ces différents registres, les chanteurs sont néanmoins amenés à utiliser pleinement les différences de qualité que peuvent leur apporter les mécanismes laryngés. Nous relèverons notamment les relations suivantes entre les principaux registres et les mécanismes

laryngés :

- le registre de poitrine (ou voix de poitrine) est considéré comme étant produit par une vibration glottique de type mécanisme M1
- le registre de falsetto (pour les hommes), de tête (ou voix de tête) (pour les femmes) est considéré comme étant produit en mécanisme M2.

Les registres occupent une place importante dans l'entrainement d'un chanteur lyrique. En effet, une exigence fondamentale de l'art lyrique est d'obtenir un timbre homogène (sans cassure) sur toute la tessiture utilisée, et cette exigence peut être difficile à réaliser par les chanteurs utilisant plusieurs mécanismes ou plusieurs registres. En effet, la perte de contrôle de la fréquence vibratoire qui marque le passage du mécanisme M1 au M2 (ou inversement) est un clair obstacle à surmonter pour les chanteurs utilisant ces deux mécanismes. C'est ce qui pousse certains chanteurs professionnels à considérer qu'une voix travaillée est une voix qui n'a plus qu'un registre (Appelman, 1967; Coffin, 1976; Miller, 1990).

## 2.1 Mécanismes et voyelles : Analyse de traités de chant

La science pédagogique des chanteurs est consignée dans les traités de chant. Nous avons donc étudié plusieurs traités et méthodes dans lesquels nous avons relevé les passages traitant d'une pédagogie incluant à la fois des éléments relatifs aux registres et aux voyelles.

Si les registres sont important pour les chanteurs, même une lecture rapide de quelques traités de chant nous permettra de nous convaincre qu'il en est de même pour les voyelles. Ces dernières sont souvent utilisées pour chercher un timbre particulier, par exemple un timbre sombre. Miller (1990) mentionne par exemple un assombrissement des voyelles pour émettre les notes aigües. Vennard (1967), qui identifie les mécanismes laryngés M1 et M2(appelés *heavy* et *light mechanisms*), ne suggère pas une utilisation privilégiée de certaines voyelles pour travailler un mécanisme donné. Coffin (1976) a établi une pédagogie complète basée sur la modification des voyelles avec la hauteur. Néanmoins l'utilisation des différents registres ne semble pas justifier selon lui une pédagogie différenciée pour les mécanismes laryngés (rien n'est précisé sur le sujet). Appelman (1967) développe bien le phénomène de «migration des voyelles», mais sans faire référence aux mécanismes (ni aux registres).

La majorité des écrits que nous avons étudiés traitant des voyelles peuvent être interprétables en termes de «formant tuning». La terminologie des mécanismes laryngés est très peu utilisée (excepté les travaux de Expert, 2003, 2007), ce qui est normal dans la mesure où cette terminologie est récente et n'appartient pas au vocabulaire musical. Nous allons maintenant étudier les passages des quelques traités abordant la questions des voyelles en lien avec l'utilisation d'un mécanisme (ou d'un registre).

**Tosi**

Tosi (1723a) est souvent considéré comme le premier auteur d'une méthode de chant donnant des indications précises en terme d'utilisation des registres. Celle-ci revêt pour nous un intérêt tout particulier, dans la mesure où Tosi était un castrat, et donc, utilisait certainement abondamment les deux mécanismes laryngés. À propos des voyelles et des registres, il écrit [1] :

> *Celui qui aurait la curiosité de découvrir la voix de fausset chez un élève qui ne sait pas la faire entendre, doit faire attention qu'en se servant de ce registre, celui-ci exprime, avec plus de force et moins de fatigue, la voyelle i que la voyelle a, sur les notes aigües. (Tosi, 1723a, p. 35)*

Pour Tosi donc, la voyelle /i/ serait plus favorable (c'est à dire permet d'émettre un son plus fort à moindre investissement physique) que la voyelle /a/ en registre de falsetto (que nous attribuons au mécanisme M2), au moins sur les «notes aigües».

1. Le texte original est: *Chi fosse curioso di scoprire il falsetto in chi lo sa nascondere badi, che chiunque se ne serve esprime su gli acuti la vocale -i- con più vigore, e meno fatica dell' -a-.* (Tosi, 1723b, p. 42) Nous citons dans le texte la traduction de Lemaire (1874).

**Garcia**

Garcia (1856) propose une pédagogie claire et différenciée en fonction du registre [2] travaillé. Le travail des différentes voyelles doit selon lui permettre de trouver différentes nuances de timbre. Ainsi, écrit-il, pour les voix de femmes et à propos de la voix de poitrine, il suggère de travailler entre si2-do3 et fa3, en cherchant un son timbré. Il ajoute

> *Plus on montera, à partir du ré3, plus il faudra ouvrir le fond du gosier. La voyelle a sera aussi ouverte que possible [...]. Si dans les premiers essais, un son du registre de poitrine refusait de sortir avec la voyelle a, ou aurait recours à la voyelle i, qui détermine un rapprochement plus exact des lèvres de la glotte [...]. (Garcia, 1856, p. 11)*

À propos de la voix de falsetto, il écrit :

> *La qualité des sons est assez souvent enfantine ; d'autres fois, elle est voilée. On corrigera le premier de ces défauts par le timbre sombre, avec la voyelle a demi o ; on combattra le second par le timbre clair, en se servant de la voyelle i. (Garcia, 1856, p. 11)*

Garcia suggère l'utilisation de la voyelle /a/ pour travailler le registre de poitrine, ou la voyelle /i/ si le /a/ ne convient pas. Pour le falsetto, il ne suggère les différentes voyelles que pour corriger certains défauts possibles. À propos des voix d'hommes, et pour leur faire travailler la voix de poitrine, Garcia écrit :

> *Les basses-tailles et les ténors attaqueront les sons de la même manière que les femmes. [...] Si l'on n'y prend pas garde, il deviendra très difficile de les faire sortir en timbre clair ; le larynx tend toujours à les sombrer. [...] Il faudra donc [...] employer le timbre clair en rendant l'a ou l'è de plus en plus ouvert. Il faut commencer à arrondir légèrement au lab2 pour les basses, aux si2-do3 pour les ténors.(Garcia, 1856, p. 12)*

À propos du raccord des registres de poitrine et de falsetto, il écrit :

> *Quant à l'union du registre de fausset avec celui de tête, nous nous contenterons de répéter qu'on l'obtient par la position qu'adopte le pharynx dans le timbre sombre et par le pincement de la glotte qu'exige la voyelle i.(Garcia, 1856, p. 12)*

Notons par ailleurs que Garcia, dans sa méthode, préconise de travailler l'union des deux registres en passant de l'un à l'autre sur la même note tenue (dans la zone commune).

**Delle Sedie**

Delle Sedie (1874) écrit :

> *Lorsqu'on attaque un son élevé avec la voix de tête, et qu'on veut obtenir la résonance grave à l'octave, on s'expose à briser la voix et à faire un Couac ; pour l'éviter il faudra augmenter la pression de l'air de soutien placé dans le porte-vent de la trachée [...] de manière que le son puisse aisément et sans effort se soutenir tandis qu'il descend à la résonnance grave. La voyelle s'arrondit et devient presque Ô tandis que le son primitif est attaqué avec la voyelle È.(Delle Sedie, 1874, p. 23)*

Si dans cet extrait nous pouvons attribuer le «couac» que Delle-Sedie mentionne à une transition de mécanisme, alors l'auteur mentionne clairement une modification de la voyelle pour masquer la transition, et associe le /ɛ/ au mécanisme M2 et le /o/ au mécanisme M1.

2. En 1840, Garcia défini les registres par *une série de sons consécutifs et homogènes allant du grave à l'aigu, produits par le développement du même principe mécanique [...] quelles que soient d'ailleurs les modifications de timbre et de force qu'on leur fasse subir.* Cette définition, fondée sur ses observations, correspond à celles des mécanismes laryngés, et d'ailleurs dans ce premier mémoire, Garcia ne définissait que deux registres, équivalents aux M1 et M2. Pour plus de détails sur la définition des registres et leur nombre chez Garcia, le lecteur peut se reporter à Castellengo (2005).

### Des méthodes plus récentes

Parmi les méthodes de chant plus récentes, peu font référence aux différences pédagogiques liées a l'utilisation des registres. Nous allons citer celles que nous avons relevées et qui proposent quelques éléments.

Pour permettre aux femmes de trouver leur «mixture de tête», **Miller (1990)** suggère des vocalises à effectuer d'abord sur la voyelle [i], puis [e], [ɛ], [ɔ], [o] et enfin [u]. Pour faire travailler les hommes (en mécanisme M1, donc), il privilégie les voyelles [a], [e] et [ɔ] dans le médium (jusqu'au premier passage, selon ses termes), puis les voyelles [i], [e], [ɔ] pour la partie plus aigüe (mais toujours en M1). Notons que Miller n'apporte pas de justification au choix des voyelles qu'il effectue ici.

**Appelman (1967)** n'a pas fait de remarque sur l'utilisation des voyelles et des registres, mais a en revanche proposé d'utiliser plutôt les voyelles postérieures pour travailler l'extension aigüe du mécanisme M1 chez les hommes :

> *All transitions into the upper voice by the male singer are made with a closed vowel. The back vowels [u] and [o] and the central* [ʌ] *are vowels that make this transition automatic.*(Appelman, 1967, p. 92)

Insistons sur le fait que l'auteur parle, selon nous, de l'extension du mécanisme M1 vers l'aigu et pas de la transition de M1 à M2.

**Coffin (1976)** relate les écrits de Husler et Rodd-Marling (Singing : The Physiological Nature of the Vocal Organ, 1965) :

> *The /A/ vowel requires the Tensor mechanism and the [u] and [i] require a Stretching action upon the vocal cords. Hence /A/ is best for low notes and the [i - a] and* [u - ʌ] *are best for the highest notes. [...] This thinning-to-thickening occurs in ascending in each register.* (Coffin, 1976, p. 88-89)

Cette remarque est intéressante pour notre propos puisque le haut du mécanisme M1 correspond précisément à des cordes vocales très tendues (que les auteurs associeraient à la voyelle /a/), alors que le bas du M2 est obtenu avec des cordes vocales plus longues et plus étirées, ce qui correspondrait aux voyelles /u/ et /i/. En ce sens, cette remarque est cohérente avec celle de Tosi.

### Discussion

Nous avons relevé ci-dessus quelques courts extraits de différents traités de chant portant à la fois sur les voyelles et registres. Nous avons sélectionné les passages que nous pouvions interpréter en termes de mécanismes laryngés. Une première constatation s'impose : aucune méthode de chant classique étudiée ici ne traite de la question comme d'une problématique clé pour l'enseignement du chant. Nous pouvons proposer quelques hypothèses pour expliquer ce constat :

- soit la question est peu pertinente
- soit la question fait référence à un savoir faire non explicité par les pédagogues, et non théorisé comme l'a été celui des registres.

Néanmoins plusieurs auteurs mentionnent de façon plus ou moins développée des éléments s'y référant, et ces éléments sont assez cohérents entre eux. Si nous interprétons maintenant les écrits des professeurs de chant en termes de mécanismes laryngés, nous constatons que Tosi considère plus facile pour des étudiants chantant en mécanisme M2 de travailler d'abord sur le /i/ que sur le /a/. L'association entre le mécanisme M1 et la voyelle /a/, et entre le M2 et le /i/ semble aussi confirmée par Husler et Rodd-Marling, elle l'est de façon moins explicite par Garcia ou Miller.

Il semble donc que la question des liens entre la voyelle et les mécanismes laryngés soit présente dans ces écrits, bien que non-théorisée et non justifiée. Nous allons maintenant présenter les conclusions d'un entretien effectué avec R. Expert à propos des associations entre mécanismes laryngés et voyelles.

## 2.2 Mécanismes et voyelle : Entretien avec un chanteur

Robert Expert (2008), au cours d'un entretien personnel, nous a livré les différentes étapes de la pédagogie qu'il a suivie pour devenir contre-ténor, ainsi que le résultat d'observations des difficultés rencontrées par les élèves de sa classe de chant. Pour lui qui chante principalement en mécanisme M2, au début de sa propre formation, les voyelles fermées étaient les plus faciles au début de sa formation vocale, car c'est sur ces voyelles qu'il était le plus à même d'équilibrer l'ensemble de son instrument vocal. La voyelle /a/ était la voyelle la plus difficile à équilibrer a priori. Une fois cet équilibre trouvé sur les voyelles ouvertes, notamment dans le grave du mécanisme M2, il a été obligé de revisiter les voyelles fermées. Toujours selon R. Expert, pour les hommes (chanteurs en mécanisme M1), la difficulté est plutôt pour eux de trouver un bon mode d'émission des notes aigües (en particulier en termes de gestion de la pression sous-glottique), ce qui est facilité par un travail sur les voyelles ouvertes.

Il nous a également livré quelques observations, en tant que pédagogue de la voix, à savoir que dans un premier temps, les voyelles fermées comme le /i/ permettaient aux chanteurs utilisant principalement le mécanisme M2 (les contre-ténors et les femmes) de conserver un timbre brillant dans le grave du M2 (notons que cette observation est conforme à la remarque de Tosi sur le falsetto et la voyelle /i/). Quand aux chanteurs de M1, l'extension de leur tessiture de M1 vers les aigus leur demandait plutôt de travailler dans un premier temps sur des voyelles ouvertes comme /a/ ou /o/ (ce qui est conforme à la remarque de Appelman). La gestion des voyelles était également primordiale pour chanter en voix mixte, en particulier le mixte de mécanisme M2.

Le discours de R. Expert est intéressant car il explicite les relations relevées dans les traités que nous avons étudiés. Il recoupe parfaitement le discours de Tosi, ce qui est intéressant dans la mesure où les deux chanteurs en questions sont des hommes chantant en mécanisme M2.

Si ces associations entre mécanismes laryngés et voyelles sont présentes dans le discours de certains chanteurs et pédagogues experts, sont-elles partagées par l'ensemble des chanteurs d'aujourd'hui? Pour répondre à cette question nous avons rédigé un questionnaire ciblé que nous avons proposé à plusieurs chanteurs, dont nous allons maintenant présenter les résultats.

## 2.3 Le discours des chanteurs aujourd'hui : analyse de questionnaires

Nous avons cherché comment les chanteurs ressentent les différents mécanismes laryngés, et s'ils ont conscience d'une relation entre mécanismes et voyelles. Il s'agit donc d'étudier un savoir-faire, ce qui contribuera à nous informer pour la description physique que nous allons expliciter au cours de notre travail. Pour accéder à cette expérience subjective des chanteurs, nous avons mis en place un questionnaire, et nous avons procédé à une analyse linguistique de contenu, c'est-à-dire à un travail sur l'articulation entre les modes d'expression (la façon dont les gens parlent) et les représentations cognitives qu'ils manifestent (donc le contenu).

Suite à la séance d'enregistrement pour la présente recherche (voir chapitre 4) à laquelle chaque chanteur a pris part, nous leur avons donc demandé de remplir un questionnaire qui est présenté dans la section 4.5. Ce questionnaire a été construit en deux parties : la première porte sur le protocole d'enregistrement que les chanteurs ont passé, la seconde sur leur ressenti par rapport aux mécanismes laryngés ainsi que sur les relations entre mécanismes et voyelles. Nous allons maintenant présenter les résultats de cette deuxième partie de questionnaire. La première partie de questionnaire sera présentée ultérieurement (partie 4.5) pour discuter de la validité du protocole d'enregistrement.

### 2.3.1 Méthode d'étude et d'analyse

#### Les chanteurs

21 chanteurs ont participé à l'enregistrement de la base de données (ils sont présentés en détail dans la partie 4), mais 16 seulement ont répondu aux questionnaires (8 femmes et 8 hommes). Il s'agit de chanteurs amateurs de niveau avancé ou de professionnels. Parmi les 16 chanteurs, 5 exercent comme orthophonistes, et ont donc un rapport au chant particulier par rapport aux autres chanteurs, dans la mesure où ils ont une connaissance théorique supplémentaire. Deux chanteurs (CT1 et T4) ont également une solide formation dans le domaine de la physiologie et acoustique de la voix.

#### Le questionnaire

Les questions posées aux chanteurs sont les suivantes :

Nom : Prénom :

Date de réponse du questionnaire :

Connaissiez-vous la terminologie des mécanismes laryngés ?

*Suite à la séance d'enregistrement, vous aurez constaté qu'au laboratoire, nous employons les termes de mécanismes laryngés. Si vous n'êtes pas familier avec cette terminologie, vous pouvez remplacer M1 par «registre de poitrine» et M2 par «registre de tête» (peut-être plutôt pour les femmes) ou «falsetto» (plutôt pour les hommes) dans la suite du questionnaire. Cependant, vous vous souviendrez qu'ils ne sont pas rigoureusement équivalents.*

[...] (partie du questionnaire présenté en partie 4.5)

- Sur quels «critères» (ils peuvent être de toute sorte) vous basez-vous pour distinguer les mécanismes M1 et M2 ? Et les registres de poitrine et de tête (ou falsetto) ? La question vaut en particulier dans la zone de passage...

- Pensez-vous avoir une perception très tranchée des mécanismes M1 et M2, ou bien y a-t-il des «zones» (en terme de hauteur, de nuance...) dans lesquelles cette distinction devient floue ?

- Utilisez-vous la «voix mixte» ? Si oui, comment la définiriez-vous ? Est-ce difficile pour vous, ou plutôt naturel ? Est-ce plus facile sur certaines voyelles ?

- Selon vous, l'une des trois voyelles étudiées (/a/, /i/ et /o/ fermé) est-elle plus facile à chanter en M1 ou en M2 ? À crescender ? À decrescender ? Avez-vous une explication à avancer, en termes de fonctionnement de votre appareil vocal, ou pouvez-vous décrire ce que vous ressentez ?

- Selon vous, quelles relations existent entre les voyelles et les mécanismes laryngés ?

- Avez-vous quelque chose à rajouter par rapport aux voyelles et/ou aux mécanismes laryngés ?

L'analyse des questionnaires a été effectuée par Luiza Maxim et Danièle Dubois dans le cadre d'une collaboration entre l'équipe voix et l'équipe LCPE (Langage, Cognition, Parole et Ergonomie) du LAM. Deux questions principales ont été étudiées, à savoir la façon dont les chanteurs

perçoivent les mécanismes laryngés et la relation entre mécanisme et voyelle. Pour étudier ces deux questions, nous avons porté une attention particulière à toutes les formes d'expression à travers lesquelles les chanteurs, soit manifestent leur ressenti, soit expriment la connaissance qu'ils ont des mécanismes. Les analyses linguistiques permettent d'identifier ce qui relève de cette connaissance subjective intuitive difficile à communiquer et des connaissances objectives acquises à travers leur formation.

### 2.3.2 La perception des mécanismes par les chanteurs

13 des 16 chanteurs ont déclaré connaitre la terminologie des mécanismes laryngés. Les chanteurs ne la connaissant pas sont CT2, Bar3 et B2. Parmi ces trois chanteurs, seul CT2 a répondu aux questions en utilisant la terminologie des mécanismes laryngés (qu'il a eu la possibilité de s'approprier au cours de l'enregistrement), les deux autres chanteurs ont utilisé la terminologie des registres, habituelle pour les chanteurs.

L'analyse linguistique a permis de dégager trois axes auxquels les chanteurs se sont référés pour décrire la façon dont ils percevaient les mécanismes laryngés :

Le premier axe concerne les ***sensations laryngées***, il a été utilisé par 8 chanteurs. Citons par exemple MS2[3] : *Sur moi, je distingue le M1 du M2 par mes **sensations au niveau du larynx** et du pharynx (je ne m'écoute pas avec mes oreilles).* Nous pouvons également citer S1 qui mentionne des ***sensations** physiques **laryngées**.* Ces deux chanteuses ne donnent pas plus d'indications sur la nature des sensations. S3 fait le même type de réponse : elle mentionne ce qu'elle *ressent au **niveau du larynx**.* MS3 mentionne que *en M1 on **sent** le travail du larynx.* S2, T1 mentionnent une activité laryngée plus marquée en M1 qu'en M2 : ***impression** de quelque chose proche du **serrage** pour M1 et de quelque chose de plus aéré au niveau **laryngé** pour M2.* Enfin CT1 déclare avoir un ressenti clair des différences laryngées entre M1 et M2 : *on **sent bien** que l'on passe d'une contraction musculaire type «biceps» en M1 à un étirement musculaire type «élastique tendu» en M2.*

Excepté CT1, tous ces chanteurs ont une perception non totalement explicitée de sensations vibratoires au niveau laryngé, qui ne seraient pas les mêmes en fonction du mécanisme laryngé utilisé. Quatre de ces chanteurs sont orthophonistes, et CT1 a de solides connaissances en physiologie et acoustique de la voix ; la description de son ressenti constitue pour lui la vérification d'une connaissance. Les chanteurs s'expriment dans des termes convenus et appris au cours de leur cursus.

Le deuxième axe concerne les **sensations corporelles vibratoires globales**. Citons B2 (qui utilise la terminologie des registres) : *En registre de tête, elles [**les impressions vibratoires**] ne sont présentes que dans la **partie supérieure du crâne**, alors qu'en poitrine c'est **tout le corps** qui vibre.* Nous pouvons aussi citer T1 : *Ressenti personnel (juste au niveau des sensations) : Le mécanisme M1 me parait être en **dessous du larynx** et le M2 au **dessus**.* Ici donc, les sensations ne sont plus localisées explicitement dans le larynx. Cet axe a été mentionné par huit chanteurs, qui ont globalement associé le mécanisme M1 à des sensations vibratoires localisées dans la poitrine et le mécanisme M2 à des sensations localisées plutôt dans la tête. Si l'on fait l'hypothèse que pour beaucoup de chanteurs, M1 est synonyme de voix de poitrine et M2 de voix de tête, la description faite ici prend tout son sens : la voix de poitrine vibre dans la poitrine et la voix de tête vibre dans la tête... Seuls deux de ces huit chanteurs sont orthophonistes (S1 et S4), et CT1 a cité cet axe comme étant *basique.* Cet axe est donc plus cité par des gens ayant une connaissance de savoir-faire et moins en référence à des connaissances théoriques sur la physiologie et l'acoustique de la voix.

Le troisième axe correspond à la **perception auditive**. À nouveau, 8 chanteurs se sont référés à cet axe pour décrire leur conception des mécanismes laryngés. Trois d'entre eux ne donnent

3. l'ensemble des citations des chanteurs apparaissent en italique dans le texte

aucun détail comme MS4 : *Je me base [...] sur ce que j'entends.* Sept autres chanteurs ont utilisé des adjectifs pour qualifier les deux mécanismes. Ainsi, pour M1 nous notons : *plein, vibrant, plus brillant*, pour M2 : *plus léger (deux fois), plus de souffle, fin.* Les chanteurs décrivent les propriétés différentes du son produit par l'utilisation des mécanismes laryngés par opposition de M1 et M2. Remarquons que deux chanteuses (S2 et MS2, deux orthophonistes) ont mentionné qu'elles utilisaient leur perception auditive pour reconnaitre les mécanismes chez les autres, et leurs sensations laryngées pour les reconnaitre chez elles.

**Conclusion**
L'analyse linguistique des réponses des chanteurs a permis de dégager trois axes utilisés par les chanteurs pour décrire leurs sensations par rapport aux mécanismes. Ces trois axes ne sont pas également évoqués par les chanteurs en fonction de leurs connaissances théoriques sur la voix. Ils permettent de mettre en évidence deux ordres de phénomènes exprimés : un phénomène subjectif, de l'ordre du ressenti (essentiellement le deuxième axe), et la description d'une objectivité apprise (premier axe).

### 2.3.3 Quelle relation entre voyelles et mécanismes ?

Parmi l'ensemble des réponses obtenues, nous avons relevé quatre personnes T5, S4, T1, MS2 associant les voyelles fermées au mécanisme M2 et les voyelles ouvertes au mécanisme M1. Sept autres chanteurs (S1, MS1, MS3, CT1, CT2, T4, Bar1) ont associé la voyelle /a/ au mécanisme M1 et la voyelle /i/ au mécanisme M2 en termes de facilité d'émission. Citons par exemple Bar1 : *Le /a/ est plus facile à produire en M1 surtout dans l'aigu*, ou encore T1 qui écrit : *J'ai eu des difficultés sur les voyelles fermées dans l'aigu (i, é) [de sa tessiture, donc du mécanisme M1, note de l'auteur].* Seul un chanteur (B2) a effectué l'association inverse.

Parmi la diversité des formulations recueillies, il apparait un **consensus** pour affirmer que le /a/ est plus facile à produire en M1 qu'en M2, et inversement pour le /i/. Ce consensus est partagé par cinq femmes et six hommes (dont les deux contre-ténors chantant en mécanisme M2), il est partagé par les chanteurs de mécanisme M1 et ceux de mécanisme M2. Parmi les personnes ne souscrivant pas à ce consensus, notons S3 et MS4 qui ont eu des difficultés avec la voyelle /o/ en M1, alors que S4 a trouvé que *le /o/ fermé est plus facile à chanter en M2 que les autres [voyelles] car c'est la voyelle la plus fermée.*

Cherchons maintenant à établir les raisons avancées par les chanteurs pour justifier leurs associations. Plusieurs chanteurs (Bar1, MS2, T4, S1) n'ont donné aucune explication à leur association.

MS1 mentionne que */i/ semble moins réalisable en M1 surtout au niveau du cresc, une **impression de serrage** et de **saturation** arrive rapidement dans le cresc.*

MS3 dit que *Peut-être que M1 est plus difficile avec **le "i" qui est formé plus "devant"**.*

T5 dit que *De façon générale, plus la voyelle est **fermée**, plus le M1 est délicat : l'**ouverture** générale de l'appareil vocal est gênée par la formation d'une voyelle fermée, notamment du fait de la **position de la langue**.[...] À contrario, de façon plus intuitive, c'est l'inverse pour le M2 (voyelles fermées plus faciles à réaliser).*

T1 [chanteur de mécanisme M1] : *Tout vient pour moi de la **position de la langue** qui malheureusement monte vers le palais avec des **sons fermés**. Si la langue remonte, le larynx aussi. Les voyelles étant formées en grande partie par la langue.*

CT2 [chanteur de mécanisme M2] : *C'est pour moi bien évidemment plus facile sur des voyelles que je pense maîtriser (arriver à trouver une " **position de bouche** " qui permet d'accéder à une maximum de **vibrations** et d'**intensité**) comme le I, le U ou le O. Le A est plus difficile.*

Pour expliquer le phénomène qu'ils mentionnent, les chanteurs ont mentionné des gestes particuliers (l'ouverture de l'appareil vocal, la position de la langue, la position du larynx, devant).

Nous constatons surtout que les explications ne concernent qu'un seul mécanisme, soit le mécanisme utilisé. C'est cohérent avec le fait que la plupart des chanteurs ont une expertise dans un seul des deux mécanismes, et que les chanteurs utilisant les deux ont une expertise orientée, visant à homogénéiser le timbre au niveau de la transition de mécanisme.

Nous constatons donc que la plupart des chanteurs ont effectué des associations entre mécanismes et voyelles, en référence à leur pratique et aux difficultés qu'ils rencontrent.

## 2.4 Conclusion

Les relations entre voyelles et mécanismes que nous avons observées au moyen du questionnaire sont relativement consensuelles, et recoupent les écrits de certaines méthodes de chant et du témoignage de R. Expert. Il semble bien que la voyelle /a/ soit plus «facilement» chantable en mécanisme M1, et la voyelle /i/ en mécanisme M2. Or ce «facilement» est un terme utilisé par les chanteurs pour exprimer leurs difficultés, et ne renvoie pas directement, en l'état des connaissances, à une grandeur mesurable physiquement, puisque l'essentiel des descriptions du fonctionnement vocal postulent une indépendance de la source et du filtre, évacuant ainsi de fait toute possibilité d'influence du filtre sur la source, et ne prenant donc pas en compte, en séparant l'étude de la voix en différents étages, l'aspect global que les chanteurs expriment soit à travers des méthodes de chant, soit en répondant aux questionnaires (voir le ressenti des mécanismes dans l'ensemble du corps).

Au cours de cette thèse, nous allons maintenant chercher des indices pouvant se rapporter à cette gestion globale du geste vocal à travers l'étude de l'influence de la voyelle sur la vibration laryngée.

## 2.5 Bilan

- Les chanteurs sont des experts de la voix chantée. Leur approche est ancrée dans l'expérience, et dans les sensations qu'ils ressentent. Leurs connaissances peuvent être théorisées et consignées dans des méthodes de chant, que nous avons analysées. Les auteurs ne laissent que peu de données explicitées concernant l'usage des mécanismes laryngés et des voyelles. D'une part ils n'utilisent pas la terminologie des mécanismes laryngés, et d'autre part, même en termes de registres, ils n'ont pas explicité de pédagogie différenciée en fonction de la tessiture du chanteur.
- Nous avons interrogé Robert Expert, chanteur contre-ténor utilisant les deux mécanismes laryngés. Ce dernier nous a confié avoir eu plus de facilité sur les voyelles fermées en mécanisme M2 au début de sa formation vocale, puis sur les voyelles ouvertes ensuite. Son expérience de professeur de chant lui permet de constater le même type d'association chez ses élèves chantant en mécanisme M2, mais pas ceux chantant en M1.
- Nous avons fait une analyse linguistique de questionnaires portant sur les mécanismes laryngés et les voyelles.
  - Les chanteurs perçoivent les mécanismes laryngés à travers trois axes: des sensations corporelles globales (localisées dans la poitrine en M1 et dans la tête en M2), des sensations laryngés, des sensations auditives. La perception des chanteurs est influencée par la connaissance qu'ils ont des principes de la production vocale, et de leur situation (émetteur ou récepteur).
  - Les chanteurs associent la voyelle /a/ ou les voyelles ouvertes au mécanisme M1 et la voyelle /i/ ou les voyelles fermées au M2 en termes de facilité d'émission.

# Deuxième partie

# Influence de la voyelle sur les phonétogrammes

# Chapitre 3

# Le phonétogramme : état de l'art

Le phonétogramme est une représentation graphique de l'ensemble des possibilités vocales du chanteur en termes de hauteur et d'intensité (voir figure 3.1).

Il a été introduit dès les années 1930 (Wolf *et al.*, 1935; Wolf et Sette, 1935) (pour une revue historique complète, voir Lamarche, 2009) ; les études portaient alors uniquement sur la limite supérieure. Plus tard il a été abondamment utilisé dans le milieu médical. Le terme utilisé pour désigner cette représentation graphique a beaucoup évolué, des termes synonymes sont «courbes vocales» (Calvet et Malhiac, 1952), «Stimmfeld» (champ vocal ou champ de liberté vocal) (Klingholz et Martin, 1983; Seidner *et al.*, 1985), ou encore «voice area», «voice profile», «F0-SPL profile». Dans de nombreuses publications il apparait sous le terme de «Voice Range Profile» (VRP, voir Bless *et al.*, 1992).

Un exemple de phonétogramme est présenté figure 3.1. La chanteuse est une mezzo-soprano, nous pouvons lire qu'elle peut chanter du do2 au sib4, avec une intensité moyenne qui augmente avec la hauteur. Nous constatons aussi que la dynamique vocale (différence entre la limite supérieure et la limite inférieure) varie en fonction de la note, elle est maximale autour du sib3, puis diminue quand la chanteuse va vers les sons plus graves ou plus aigus. Le phonétogramme permet entre autres de déceler si quelqu'un a une défaillance sur certaines notes (ce qui n'est pas le cas chez cette chanteuse professionnelle). Cet outil est donc largement utilisé pour étudier les voix pathologiques.

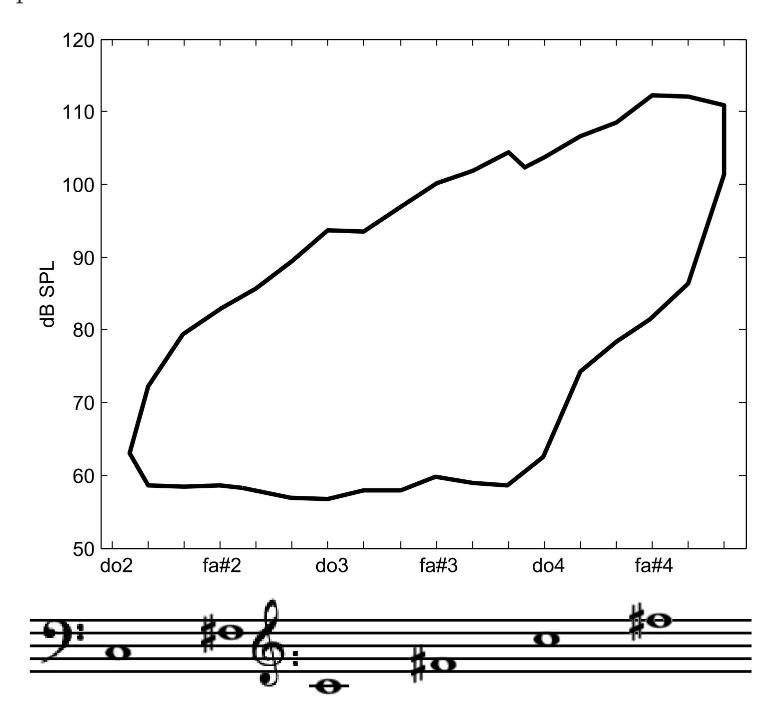



Fig. 3.1 – *Phonétogramme global d'une mezzo-soprano (MS). Voyelle : /a/*

Nous présenterons tout d'abord les méthodes de l'établissement et d'analyse d'un phonéto-

gramme. Puis nous décrirons quelques spécificités des phonétogrammes de chanteurs, ainsi que les phonétogrammes de paramètre. Enfin nous aborderons l'établissement des phonétogrammes par mécanismes laryngés et par voyelles.

## 3.1 Acquisition et analyse d'un phonétogramme

Comme l'usage du phonétogramme est très répandu dans les communautés scientifiques et médicales, il est apparu nécessaire de normaliser la procédure d'acquisition ainsi que sa représentation graphique (Damsté, 1970; Schutte et Seidner, 1983). Les phonétogrammes sont habituellement enregistrés à l'aide d'un microphone omnidirectionnel, placé à 30 cm de la bouche du chanteur, l'expérimentateur pouvant éventuellement visualiser en direct la forme de la figure obtenue pour contrôler que toutes les zones ont été explorées.

### 3.1.1 Protocole : Phonétogrammes physiologiques et phonétogrammes chantés

Le protocole d'enregistrement, donc la tâche à accomplir par les chanteurs, peut influencer le résultat final. D'une part, il n'est pas évident qu'un protocole constitué de crescendos et decrescendos donne le même résultat qu'un protocole constitué de notes tenues et attaquées à l'intensité maximale ou minimale, ou encore de glissandos. D'autre part en ce qui concerne la voix chantée, un choix fondamental est à effectuer : le phonétogramme doit-il représenter l'ensemble des sons qu'un chanteur peut produire, ou l'ensemble des sons qu'il est susceptible d'utiliser en pratique? La deuxième option suppose une certaine qualité de timbre qui n'est pas exigée dans la première. Cette distinction est au coeur des enregistrements phonétographiques depuis leurs débuts, puisque Wolf *et al.* (1935) avaient déjà choisi de ne pas enregistrer les productions de «falsetto» des hommes, car ceux-ci ne les utilisaient pas en représentation. Coleman et Mott (1978) ont ensuite proposé de définir des phonétogrammes physiologiques et des phonétogrammes musicaux, mais prenaient en compte cette considération uniquement pour établir l'étendue fréquentielle à explorer.

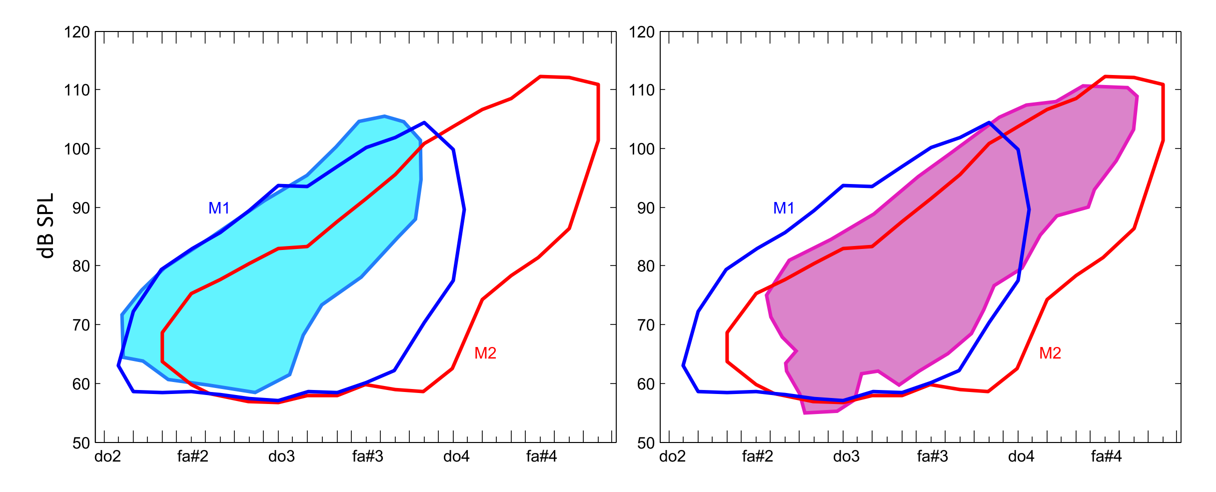



Fig. 3.2 – *Phonétogrammes par mécanismes laryngés (sur la voyelle /a/) de MS, une chanteuse travaillant deux techniques vocales : le chant traditionnel breton et le chant lyrique. Sur la figure de gauche, nous avons ajouté la zone présentant les productions musicales correspondant à trois chants bretons (chantés en mécanisme M1), et sur la figure de droite, l'ensemble des productions émises lors de l'interprétation d'un air de Rossini et d'un air de Schumann (en mécanisme M2).*

La figure 3.2 présente les phonétogrammes par mécanismes laryngés de MS (la réunion des phonétogrammes en M1 et en M2 permet d'obtenir les limites présentées figure 3.1). Ces phonétogrammes ont été obtenues en demandant à la chanteuse des crescendi et des decrescendi amenés jusqu'à leur limite en intensité. Nous pouvons donc les considérer comme des phonétogrammes physiologiques. Nous y avons ajouté des zones correspondant à différents morceaux

chantés au laboratoire, dans les mêmes conditions expérimentales. La zone colorée de la figure de gauche correspond à de la musique traditionnelle bretonne (chantée en mécanisme M1), celle de la figure de droite à du chant lyrique (mécanisme M2 pour cette chanteuse) (la chanteuse est professionnelle dans ces deux catégories). Nous constatons que le phonétogramme exploré selon notre protocole englobe les productions musicales et donne des informations supplémentaires aux intensités les plus faibles ainsi qu'aux extrêmes de la tessiture (grave-aigu).

Lamarche (2009) a étudié l'influence de différents protocoles sur des phonétogrammes de femmes. Elle a établi un phonétogramme «physiologique» en demandant des glissandi ascendants et descendants répétés, et plusieurs phonétogrammes musicaux (performance Voice Range Profile) : un premier enregistré à partir de *messe di voce* (augmentation puis diminution de l'intensité sur une note tenue, avec une qualité musicale) à différentes hauteurs, un deuxième sur des vocalises de différentes intensités, et un dernier produit en chantant un air choisi par le chanteur. Lamarche a établi que le phonétogramme basé sur l'air était différent des autres, notamment avec une limite inférieure relativement haute. C'est à dire qu'en chantant leur air, les chanteurs ne descendaient pas au minimum de l'intensité. Néanmoins un tel phonétogramme reste très fortement caractéristique de l'air chanté (notamment en termes de tessiture). Les deux autres phonétogrammes musicaux étaient plus «larges», mais néanmoins nettement différents du phonétogramme physiologique. Ces considérations sont tout à fait en accord avec la figure 3.2.

En fait, pour représenter l'utilisation qu'un chanteur fait de sa voix en concert, il serait peut être plus pertinent de porter sur le phonétogramme le pourcentage d'utilisation de chaque zone. Il est probable que la partie fortissimo serait plus utilisée que les zones pianissimo.

Remarquons enfin sur la figure 3.2 que MS a produit des sons un peu plus forts dans le contexte chanté que lors du phonétogramme physiologique. Il est très vraisemblable que le contexte musical lui a permis spontanément de produire ce type d'émission qu'elle n'a pas trouvé pour le phonétogramme physiologique. Il est probable que la même chanteuse enregistrée sur une scène d'opéra devant une salle comble, aurait encore d'autres possibilités. Nous touchons aux limites des expériences de laboratoire, limites qu'il est bon de garder à l'esprit pour aborder l'ensemble du travail qui suit.

Dans la suite de la thèse, le terme de phonétogramme se réfèrera à un phonétogramme physiologique (sauf précision explicite contradictoire).

### 3.1.2 Méthodes d'analyse du phonétogramme

#### dB vs dB-A

Nous avons tracé le phonétogramme de la figure 3.1 avec des notes sur l'axe des abscisses (ce qui revient à une échelle fréquentielle logarithmique), et en exprimant l'intensité en dB-SPL. Le dB-A a été beaucoup utilisé, il offre l'avantage d'atténuer les bruits basses fréquences qui sont fréquents dans un environnement médical. L'utilisation du dB-A a pour effet d'abaisser la limite inférieure (Gramming et Sundberg, 1988), donc de sur-représenter la partie pianissimo du phonétogramme.

#### Décrire le phonétogramme

Un certains nombre de paramètres ont été proposés pour décrire les formes des phonétogrammes. Nous avons retenu la pente du phonétogramme (en dB/oct ou dB/demi-ton) qui permet de chiffrer l'augmentation globale de l'intensité en fonction de la hauteur, et l'aire du phonétogramme (en dB*demi-ton). La dynamique du chanteur est définie comme la différence entre la limite supérieure et la limite inférieure. Exprimée en fonction de la hauteur, elle permet de décrire si le chanteur a beaucoup de possibilités à hauteur donnée. D'autres paramètres existent, notamment des descripteurs de forme. Ils sont définis par Sulter *et al.* (1994).

#### Méthodes de comparaison

Pour comparer les phonétogrammes de plusieurs sujets, il faut établir une base à partir de laquelle nous pourrons établir des comparaisons. Une méthode immédiate est de moyenner des phonétogrammes à fréquence donnée. Cette méthode a le désavantage de ne pas pouvoir décrire

une grande population, au sein de laquelle il y a nécessairement des différences de tessiture. Pour y remédier, Hacki *et al.* (1990) ont proposé d'établir des phonétogrammes moyens par tessiture vocale. Pour cela, ils choisissent de ne retenir que l'ensemble des points phonétographiques atteints par un pourcentage donné de leurs sujets (50 % par exemple). Ils ont utilisé cette méthode pour décrire des phonétogrammes moyens de sopranos et de contre-altos. Une autre méthode initiée par Coleman et Mott (1978), puis développée par Schultz-Coulon et Asche (1988) et Sulter *et al.* (1994), consiste à décrire la tessiture du chanteur en termes de pourcentage de son étendue totale. Dans ce cadre, le phonétogramme est décrit par une limite supérieure, correspondant aux intensités maximales, et une limite inférieure (pour les intensités minimales) ; chacune échantillonnée en onze points régulièrement répartis (à 0%, 10%, ..., jusqu'à 100% de la tessiture). Cette méthode, appelée *rescaling method* (en anglais) permet de comparer les phonétogrammes de différents chanteurs à position donnée au sein de la tessiture (relativement à ses extremums). Elle a plusieurs désavantages : d'une part l'information de la fréquence d'émission est perdue, et d'autre part, les phonétogrammes peuvent être fortement déformés : ainsi le phonétogramme d'un chanteur couvrant une étendue d'une octave et demie aura-t-il la même «taille» que celui d'un chanteur couvrant trois octaves.

Il n'y a pas de méthode parfaite pour comparer des phonétogrammes. L'expérimentateur doit choisir un type de représentation en fonction de ce qu'il souhaite mettre en évidence. La difficulté est de trouver l'invariant en fonction duquel nous souhaitons comparer les phonétogrammes (la fréquence ou le pourcentage de tessiture ci-dessus).

## 3.2 Les phonétogrammes et les chanteurs

Certains aspects de l'entrainement vocal (nous resterons dans la tradition lyrique occidentale) et des différences vocales entre hommes et femmes peuvent être décrites à l'aide d'un phonétogramme.

### 3.2.1 Entrainement vocal

Il existe de nombreuses façons d'étudier l'influence de l'entrainement vocal sur les phonétogrammes. Deux façons d'aborder la question ont été développées dans la littérature :

- comparer des phonétogrammes de chanteurs entrainés et de non-chanteurs.
- enregistrer régulièrement et sur plusieurs années des phonétogrammes d'élèves étudiant le chant.

Gramming et collaborateurs (Gramming, 1991; Akerlund *et al.*, 1992; Gramming *et al.*, 1988) ont abordé la question par la première approche. Ils ont enregistré des phonétogrammes de 10 chanteurs, 10 non-chanteurs, 10 chanteuses et 10 non-chanteuses. Seule la voyelle /a/ a été utilisée, et les phonétogrammes ont été moyennés après application de la *rescaling method* (cf. section 3.1.2). Ils ne décèlent globalement pas d'influence de l'entrainement vocal chez les hommes, et une augmentation de la limite supérieure chez les femmes. Akerlund et Gramming (1994) ont montré que cette augmentation chez les femmes était liée à une augmentation très importante de la pression sous-glottique. Seidner *et al.* (1985) ont étudié les intensités maximales et minimales produites sur les voyelles /a/, /i/ et /u/ par 30 chanteurs, 30 étudiants en classe de chant et 30 non chanteurs, répartis dans les six tessitures vocales (soprano, mezzo-soprano, alto, ténor, baryton et basse). Ils constatent que l'entrainement vocal aurait pour conséquence d'augmenter les intensités minimales et maximales chez les voix de femmes, et d'augmenter légèrement la dynamique chez les hommes par diminution de l'intensité minimale et augmentation de l'intensité maximale. Ces deux études ne donnent pas des résultats fondamentalement différents en dépit de protocoles d'études très variables. Gramming explique ses résultats en notant que les chanteurs masculins travaillent beaucoup à développer leur formant du chanteur, qui a une influence relativement faible sur le SPL, alors que les femmes cherchent plutôt à gagner de la puissance en alignant les formants sur les harmoniques, ce qui a une influence très importante sur le niveau SPL (notamment dans leur tessiture). La différence de stratégie serait alors liée à

la différence de tessiture. Sulter *et al.* (1995) ont étudié l'influence de l'entrainement vocal chez 92 femmes et 47 hommes, également en utilisant la *rescaling method*. Ils ont établi que l'entrainement vocal se traduit par une augmentation de l'aire des phonétogrammes ainsi que, chez les femmes, une augmentation de la tessiture. Roubeau *et al.* (2004) ont étudié des phonétogrammes par mécanismes laryngés de 42 sujets, hommes et femmes, classés dans trois catégories vocales (non-entrainé, amateur et professionnel). Ils ont également décelé une augmentation de l'aire des phonétogrammes avec l'entrainement vocal, dans le mécanisme laryngé utilisé pour chanter. Ce résultat est également en accord avec les travaux de Konzelmann *et al.* (1989).

Awan (1991) a adopté une démarche un peu différente : il a demandé à 20 chanteurs et 20 non-chanteurs d'effectuer des sons filés (crescendo et decrescendo) sur différentes notes, sur la voyelle /a/, avec un impératif esthétique : les phonétogrammes obtenus seraient donc plus proches de phonétogrammes musicaux. Il a alors constaté une nette augmentation de l'étendue de la tessiture, ainsi qu'une augmentation de la limite supérieure et un abaissement de la limite inférieure avec l'entrainement vocal.

Pour résumer, l'entrainement vocal semble donc porter à la fois sur un agrandissement des capacités vocales (notamment chez les femmes en termes de limite supérieure des phonétogrammes, ce qui impliquera une augmentation de l'aire), ainsi qu'un élargissement de la zone musicalement utilisable.

LeBorgne et Weinrich (2002) ont choisi la deuxième approche. Ils ont suivi pendant 9 mois 21 étudiants en chant, et ont aussi utilisé la «rescaling method». Ils ont constaté que l'enseignement qui leur avait été dispensé s'était accompagné d'une augmentation de leur tessiture ainsi que d'un abaissement de la limite inférieure. Mürbe *et al.* (1999) ont également effectué une étude longitudinale de ce type, enregistrant les phonétogrammes de 25 personnes (5 sopranos, 5 altos, 5 ténors, 5 barytons et 5 basses) à l'entrée en conservatoire et à la sortie (4 ou 5 ans plus tard). Ils trouvent que le niveau global augmente avec l'entrainement vocal, et que la corrélation entre hauteur et intensité diminue.

Nous mettrons tous ces résultats en rapport avec notre propre expérience et commenterons ces données dans la section 5.3.

### 3.2.2 Différences hommes - femmes

Plusieurs différences phonétographiques entre les hommes et les femmes ont déjà été citées dans le paragraphe précédent. Les hommes chantent plus grave que les femmes, cette différence est due à un développement différencié du larynx au moment de la mue (Ormezzano, 2000). Plusieurs études ont comparé des phonétogrammes féminins et masculins (Sulter *et al.*, 1994; Gramming, 1991), sans prendre en compte les mécanismes laryngés. Or dans le chant lyrique occidental, la différence majeure entre les hommes et les femmes est que les premiers chantent essentiellement en mécanisme M1 et les secondes en mécanisme M2. Donc si l'on souhaite étudier les différences phonétographiques entre hommes et femmes, il est impératif de prendre en compte les mécanismes laryngés, car dans le cas contraire les différences observées peuvent être dues aussi bien au sexe du chanteur qu'au mécanisme laryngé utilisé. Roubeau *et al.* (2004) ont effectué des phonétogrammes par mécanisme et ont montré que l'aire du phonétogramme du mécanisme utilisé est toujours plus grande que celle du mécanisme non-utilisé (ou secondairement utilisé), mais que la zone de recouvrement des mécanismes demeure équivalente chez les hommes et chez les femmes. Cette spécificité est à rapprocher de l'entrainement vocal, et serait peut être liée à un fondement culturel.

## 3.3 Le phonétogramme de paramètre

Le phonétogramme est un outil incomplet pour décrire l'ensemble de spécificités d'une voix. En particulier, le timbre de la voix n'y apparait pas directement, ce qui est une limitation importante dans l'étude de la voix chantée. Pour palier à cette limitation, Pabon et Plomp (1988) ont proposé une méthode d'enregistrement automatique du phonétogramme augmenté de paramètres acoustiques décrivant la qualité vocale. Graphiquement, ces paramètres apparaissent

sous forme d'un dégradé de couleur à l'intérieur des limites phonétographiques. Leur but étant de caractériser les voix pathologiques, les auteurs ont choisi d'étudier le jitter comme paramètre de perturbation, la différence d'énergie entre les bandes 0-1.5 kHz et 1.5-5 kHz comme estimation de la pente spectrale (cette méthode d'estimation est discutée en partie 7.1), et le niveau sonore au delà de 5 kHz comme une estimation du caractère soufflé de la voix (*breathiness*). Plus tard, Pabon (1991) a ajouté à ces paramètres le shimmer et le facteur de crête (rapport, exprimé en dB et calculé sur une fenêtre de 50 ms, de l'amplitude du signal sonore par sa moyenne quadratique) comme un autre estimateur de la pente spectrale.

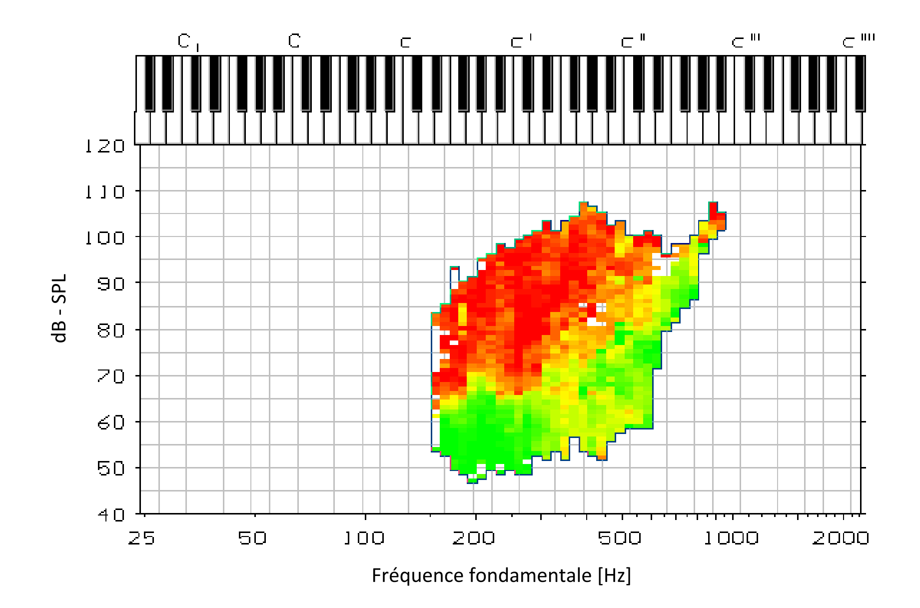



Fig. 3.3 – *Exemple de phonétogramme de facteur de crête (l'échelle de couleur ou de gris va de 3 à 8 dB). D'après Pabon (2004)*

Selon Pabon et Plomp (1988), l'utilisation de tels phonétogrammes permet de relever des changements de qualités vocales pertinents en termes de description des voix pathologiques. Elle permet en outre de visualiser les variations d'un paramètre donné à la fois en fonction de la hauteur et de l'intensité, et de comparer des valeurs de ces paramètres entre plusieurs phonétogrammes à hauteur et intensité donnée. Le seul inconvénient de cette représentation est qu'elle ne permet pas de rendre compte de l'éventuelle variabilité du paramètre étudié pour chaque point du phonétogramme.

Les phonétogrammes de paramètres seront utilisé dans les chapitres 6 et 7.

## 3.4 Phonétogrammes, mécanismes, voyelles

À plusieurs reprises nous avons mentionné l'importance de la prise en compte des mécanismes laryngés pour l'établissement d'un phonétogramme. Nous allons maintenant détailler ce point précis, puis décrire l'influence de la voyelle sur les phonétogrammes.

### 3.4.1 Phonétogramme et mécanismes laryngés

Nous avons présenté dans la partie 1.2 ainsi que dans la partie 3.1.1 des phonétogrammes par mécanismes laryngés. La pratique consistant à distinguer les mécanismes laryngés lors de l'acquisition est peu répandue dans la communauté scientifique internationale, la plupart des auteurs (Calvet et Malhiac, 1952; Calvet, 1953; Coleman, 1993; Dejonckere, 1977; Klingholz et Martin, 1983; Komiyama *et al.*, 1984; Klingholz, 1992; Sulter *et al.*, 1994; Konzelmann *et al.*, 1989) repèrent un changement de registre par une inflexion de la limite supérieure du phonétogramme. Dans l'hypothèse où ces auteurs ont utilisé la terminologie des registres pour décrire

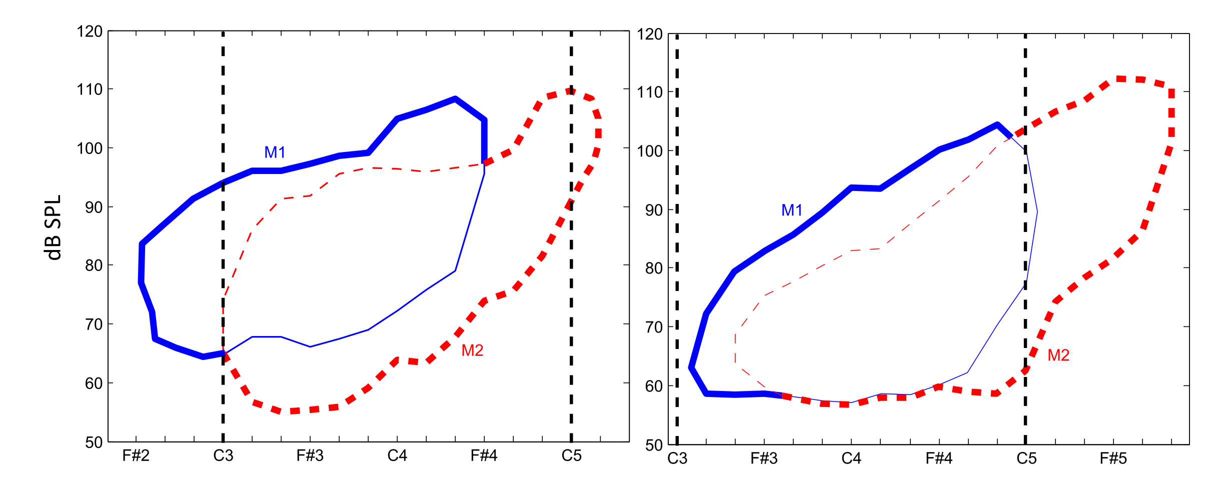



Fig. 3.4 – *Phonétogrammes de mécanismes laryngés d'un contre-ténor (CT1, figure de gauche), et d'une mezzo-soprano (MS, figure de droite). M1 : bleu plein, M2 : rouge pointillé. Voyelle : /a/. Les mécanismes présentent une large zone de recouvrement (une octave et demie pour chaque chanteur). Les limites des phonétogrammes «globaux» (celles habituellement étudiées) sont tracées en traits larges, et les limites de la zone de recouvrement sont tracées en traits fins. Les barres verticales en tirets indiquent la tessiture do2-do4.*

la vibration laryngés, nous considérons que cette méthode présente deux défauts notables :

- les décrochements de la limite supérieure peuvent être dus à d'autres phénomènes que des changements laryngés, par exemple l'éloignement d'un des premiers harmoniques du premier formant.
- cette méthode laisse supposer que le «changement de registre» est effectué à une hauteur précise et identifiable. Or nous savons (partie 1.2) qu'il existe une large étendue fréquentielle commune aux deux mécanismes laryngés, ce qui se traduit sur le phonétogramme par une zone commune aux deux mécanismes laryngés.

Les premiers chercheurs (Wolf *et al.*, 1935) voulant représenter la voix chantée de barytons ont demandé au chanteur de ne pas produire de falsetto, ce qui, si l'on interprète cette consigne en termes de mécanismes laryngés, revient à effectuer un phonétogramme de mécanisme M1.

Colton et collaborateurs (Colton, 1970, 1973; Colton et Hollien, 1972) ont étudié les intensités maximales et minimales pouvant être produites dans les registres modal et falsetto, à même fréquence. Ils ont constaté que l'intensité maximale était plus faible en registre falsetto qu'en registre modal. Si l'on interprète la consigne en termes de mécanismes laryngés, il s'agit de déterminer les limites supérieures et inférieures des mécanismes laryngés dans la zone de recouvrement. Il ont travaillé exclusivement sur la voyelle /a/, et avec des sujets masculins, donc non entrainés à chanter en mécanisme M2.

La figure 3.4 présente deux phonétogrammes, établis séparément en M1 et en M2. Cette procédure, également utilisée par Schutte (1980), Ragot (1998) ou Roubeau *et al.* (2004), permet de mettre en évidence l'étendue de la zone de recouvrement des mécanismes laryngés M1 et M2. Cette distinction permet d'effectuer des interprétations plus précises quant au lien entre la forme des phonétogrammes et la production vocale. Comme nous l'avons cité, Roubeau *et al.* (2004) ont ainsi montré qu'elle permettait de comparer plus objectivement des phonétogrammes d'hommes et de femmes.

### 3.4.2 Phonétogrammes par voyelles

La voyelle est connue depuis longtemps pour être un paramètre susceptible d'influencer les limites phonétographiques. Wolf *et al.* (1935) ont étudié les limites supérieures des phonétogrammes de 5 barytons sur plusieurs voyelles dont /a/ et /i/. Ces limites obtenues sont situées à des intensités plus grandes sur /a/ que sur /i/. Stout (1938) a obtenu des résultats similaires, également avec des chanteurs masculins. Seidner *et al.* (1985) ont également enregistré des pho-

nétogrammes. Ils ont travaillé avec 90 sujets, hommes et femmes, et les voyelles /a/, /i/ et /u/. Ils ont constaté une influence de la voyelle chez les hommes (les limites inférieures et supérieures sont plus éloignées sur /a/ que sur /i/ et /u/), mais pas chez les femmes. Gramming et collaborateurs (Gramming et Sundberg, 1988; Gramming, 1991) ont établi des phonétogrammes par voyelles (/a/, /i/ et /u/) pour 22 sujets féminins étudiants en orthophonie. Ils présentent des phonétogrammes normalisés en fréquence (*rescaling method*, cf. partie 3.1.2), et moyennés sur les 22 sujets. Ils obtiennent une limite supérieure 10 dB plus intense sur /a/ que sur /i/ et /u/ dans le grave alors que cette différence tend à se réduire vers les hautes fréquences.

Gramming a également établi des phonétogrammes par voyelles pour un homme et pour une femme. Elle a entre autres étudié les voyelles /a/ et /i/. Elle constate que la limite supérieure du /a/ chez l'homme est supérieure à celle des autres voyelles, cette tendance se retrouvant dans une moindre mesure dans le grave de la tessiture de la femme, mais pas dans le haut.

L'ensemble de ces études semble s'accorder pour affirmer une variabilité due à la voyelle sur les limites phonétographiques (ou du moins sur la limite supérieure) chez les hommes. Chez les femmes, cette tendance n'est pas nette, nous l'avons relevée dans les parties graves de leur phonétogrammes et pas dans les parties aigües. Or nous avons vu dans la partie 1.2 que les hommes utilisent le mécanisme M1 exclusivement (à l'exception des contre-ténors), alors que les femmes utilisent principalement le mécanisme M2 (dans le chant lyrique occidental). Qu'apporterait la prise en compte des mécanismes laryngés dans l'étude des phonétogrammes par voyelles ?

## 3.5 Orientation de l'étude

L'étude de phonétogrammes par mécanismes laryngés et par voyelles nous permettra de comprendre s'il existe une corrélation entre l'influence de la voyelle sur la dynamique vocale en M1 et en M2, et les difficultés plus ou moins grandes qu'ont mentionnées les chanteurs à utiliser certaines voyelles dans certains mécanismes. La dynamique vocale est-elle plus grande sur /a/ que sur /i/ en M1 et inversement en M2 ?

Nous avons en outre souhaité étudier l'incidence de la voyelle sur d'autres paramètres, acoustiques (répartition de l'énergie dans le spectre) ou glottiques (quotient ouvert, amplitude du signal EGG, position verticale du larynx). Parmi ces paramètres (dont le choix sera justifié dans les chapitres 6 et 7), certains varient en fonction de la voyelle, d'autres en fonction du mécanisme laryngé. Le phonétogramme par paramètre nous permettra de visualiser si l'incidence de la voyelle sur ces paramètres est la même en M1 et en M2.

Pour cela, nous avons eu besoin de construire une base de données. Nous allons maintenant détailler la façon dont nous l'avons constituée et traitée.

## 3.6 Bilan du chapitre

Un phonétogramme est une représentation graphique de l'évolution de la dynamique vocale en fonction de la hauteur. Le protocole d'enregistrement et le dispositif expérimental influencent le résultat obtenu, d'où la nécessité de les normaliser pour rendre les études comparables.

L'entrainement vocal et le sexe des chanteurs sont des facteurs de variations des phonétogrammes.

La voyelle influence également les contours phonétographiques, mais les études disponibles dans la littérature semblent montrer que cette influence serait différente chez les hommes et chez les femmes. Cette différence est-elle liée à l'utilisation des mécanismes laryngés ?

L'établissement de phonétogrammes par mécanisme laryngé permet de comparer les productions de M1 et de M2 (dans leur zone commune), ou la dynamique dans les deux mécanismes, à même hauteur et même intensité. Cela nous permettra donc de comparer l'influence de la voyelle sur la dynamique vocale comme sur différents paramètres acoustiques et glottiques, en M1 et en M2.

# Chapitre 4

# Constitution et traitement de la base de données

Pour explorer l'incidence de la voyelle en mécanisme M1 et en M2, il est nécessaire de constituer une base de données représentative de la production vocale chantée d'hommes et de femmes formés au chant classique. Notre protocole doit nous permettre d'établir les phonétogrammes par mécanisme laryngé et par voyelle. Il doit aussi nous permettre de comparer, à hauteur et intensité fixes, les valeurs prises par les paramètres acoustiques et glottiques associés aux productions chantées, que nous avons choisies.

## 4.1 Le dispositif expérimental

Le signal sonore est enregistré à l'aide d'un microphone de pression 1/2" (Brüel & Kjaer 4191), placé à 30 cm de la bouche du chanteur. Ce microphone est relié à un préamplificateur Brüel & Kjaer 2669 puis à un amplificateur Brüel & Kjaer Nexus 2690.

Le signal EGG est obtenu à l'aide d'un électroglottographe EG-2-PC, dont la particularité est d'être munie de deux paires d'électrodes, ce qui permet de tenir compte des mouvements verticaux du larynx. Outre le signal EGG, l'appareil délivre un autre signal de très basse fréquence représentant les mouvements verticaux du larynx (VLP, pour *Vertical Larynx Position*). Nous avons choisi de l'acquérir pour pouvoir étudier les variations de la position verticale du larynx des chanteurs. Pour cela, nous l'avons utilisé pour moduler en fréquence un signal sinusoïdal de 1 kHz obtenu à l'aide d'un générateur de fonction (Beckman Industrial FG2A). Le signal obtenu est ensuite démodulé sous Matlab, et l'on récupère alors le VLP délivré par l'électroglottographe.

Les trois signaux (sonore, EGG et VLP) sont acquis avec une carte son Metric Halo Mobile 2882 connectée à un Macintosh. La modulation en fréquence du signal de position verticale du larynx est nécessaire car la carte son coupe les signaux de très basse fréquence, et donc filtre le signal que nous souhaitions acquérir.

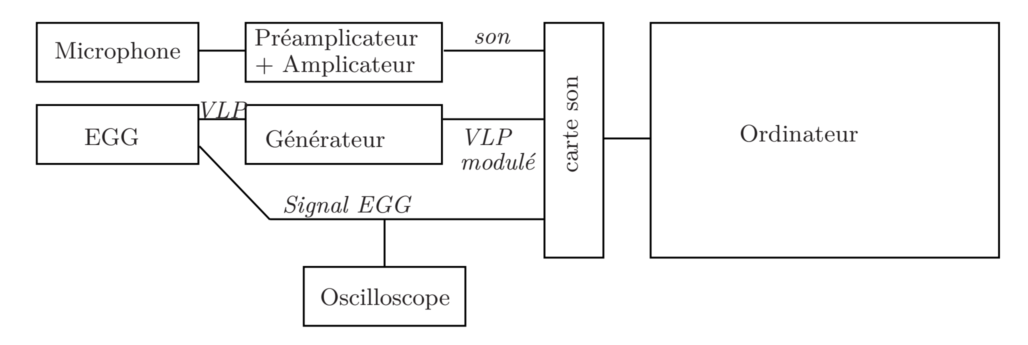



Fig. 4.1 – *Schématisation du dispositif d'acquisition*

Outre le dispositif d'acquisition, nous avons utilisé un oscilloscope numérique pour visualiser le signal EGG lors de l'enregistrement. Ce dispositif nous a permis, dans certains cas, de confir-

mer ou d'infirmer le mécanisme laryngé que le chanteur pensait utiliser par l'observation de la forme du signal EGG. L'ensemble du dispositif est schématisé figure 4.1.

Nous avons pris le parti d'effectuer les enregistrements dans une salle suffisamment grande pour que le chanteur et l'expérimentateur puissent s'y tenir, ce qui est plus confortable pour le chanteur et qui offre la possibilité d'interagir avec le chanteur en cours d'enregistrement. Cette salle est calme, isolée de l'extérieur et à faible réverbération (temps de réverbération à 60 dB : 0.30 s à 1 kHz).

## 4.2 Les chanteurs

21 chanteurs ont gracieusement et bénévolement accepté de participer à notre étude. Ils pratiquent tous le chant régulièrement, à un niveau amateur avancé ou professionnel. Le tableau 4.1 présente un aperçu succinct concernant leur tessiture, leur formation vocale. Précisons que plusieurs d'entre eux ont suivi une ou plusieurs autres formations musicales, en particulier ils ont appris un ou plusieurs instruments de musique ou exploré d'autres styles musicaux que le chant lyrique. La figure 4.2 présente l'étendue explorée au cours de l'enregistrement, dans les deux mécanismes laryngés.

## 4.3 Protocole d'enregistrement

### 4.3.1 Quel type de production vocale ?

Notre but étant à la fois d'obtenir des informations sur les potentialités maximales des chanteurs et sur la qualité vocale à l'«intérieur» des phonétogrammes, nous avons choisi de demander aux chanteurs d'effectuer des crescendi et decrescendi. Les crescendi doivent commencer sur une nuance assez piano et s'achever sur la nuance la plus forte possible, et les decrescendi devaient aller d'une nuance assez forte jusqu'au plus piano possible (le seuil de phonation), de sorte que toute la gamme d'intensité soit bien produite au cours du protocole.

### 4.3.2 Mécanisme laryngé

Chaque chanteur a produit l'ensemble des productions demandées, successivement en mécanisme M1 et en mécanisme M2 dans la mesure de ses possibilités.

### 4.3.3 Voyelles étudiées

Du point de vue méthodologique, il parait sensé d'étudier les trois voyelles formant les angles du triangle vocalique, c'est à dire les voyelles /a/, /i/ et /u/. Or l'objectif des chanteurs n'est évidemment jamais d'ajuster parfaitement les deux ou trois premiers formants avec des valeurs théoriques définies, mais bien plus d'affiner au mieux leur rendement vocal et la qualité de leur voix. Pour cela, les voyelles sont constamment modifiées par le chanteur, et certaines sont même très éloignées du point de vue phonétique ou articulatoire des voyelles parlées, comme la voyelle /u/. Cela n'empêche pas à l'auditeur d'entendre un /u/ dans certains cas, néanmoins beaucoup de chanteurs savent effectuer les ajustements nécessaires pour chanter cette voyelle qui, prise hors contexte, serait plutôt catégorisée comme un /o/. Pour cette raison, nous avons choisi de ne pas demander de /u/ mais plutôt un /o/ aussi fermé que possible. Les trois voyelles retenues sont donc /a/, /i/ et /o/ (fermé). Les voyelles nasales ne sont pas abordées.

### 4.3.4 Tessiture

Notre objectif étant de nous concentrer sur la zone de recouvrement des mécanismes laryngés, nous avons choisi la zone s'étendant de do2 (131 Hz) à do4 (523 Hz). Les phonétogrammes présentés seront donc qualifiés de phonétogrammes partiels. La tessiture a été explorée selon une échelle par tons, les productions demandées devaient donc être sur les notes suivantes : do2, ré2,

| | Tessiture | Âge | Profession | Formation vocale | Répertoire |
|---|---|---|---|---|---|
| S1 | Soprano | 41 | orthophoniste | conservatoire, cours privés (12 ans) | oratorio, mélodies, opéra |
| S2 | Soprano | 37 | orthophoniste | cours privés (7 ans), ensemble vocal (11 ans) | classique, baroque, médiéval |
| S3 | Soprano lyrique légère | 24 | étudiante (chant) | cours privés (2 ans), conservatoire (3 ans) | opéra, mélodie, opérette, oratorio |
| S4 | Soprano 2 | 33 | orthophoniste | cours privés, chorale | classique, chanson, comédie musicale |
| MS1 | Mezzo-soprano | 26 | étudiante (chant) | conservatoire, choeur (20 ans) | lyrique |
| MS2 | Mezzo-soprano | 28 | orthophoniste | cours privés, chorale (7 ans) | gospel |
| MS3 | Mezzo-soprano | 40 | chanteuse | cours privés (12 ans), conservatoire (10 ans), choeur (4 ans) | Mélodie, lieder |
| MS4 | Mezzo-soprano | 26 | chanteuse lyrique | conservatoire (11 ans), choeur | Baroque, classique, romantique |
| CT1 | Contre-ténor | 43 | chanteur, professeur de chant | CNR (4 ans), CNSM (1997), cours privés, master classes, nombreux prix | de la renaissance aux musiques actuelles |
| CT2 | Contre-ténor | 37 | enseignant | choeur (21 ans), cours privés | du baroque au contemporain |
| T1 | Ténor lyrique léger | 29 | chanteur lyrique | conservatoire et CNSM (sortie en 2006) | opéra, lied, oratorio |
| T2 | Ténor | 34 | Artiste lyrique | conservatoires, CNR (8 ans), cours privés (9 ans) | Lyrique, mélodie, baroque |
| T3 | Ténor | 24 | étudiant | choeur (20 ans), cours privés et conservatoire (2 ans) | |
| T4 | Ténor | 43 | enseignant-chercheur | cours privés occasionnels, choeur (8 ans) | classique, baroque |
| Bar1 | Baryton | 52 | orthophoniste | ENM, cours privés | musique ancienne, mélodie |
| Bar2 | Baryton | 39 | artiste lyrique, pianiste | cours privés | baryton léger, mélodie, lied |
| Bar3 | Baryton | 37 | chanteur | CNR (sortie 2007) choeur (14 ans) | varié, dominante baroque/renaissance |
| Bar4 | Baryton | 22 | étudiant (chant) | conservatoire, choeur (3 ans) | lyrique, mélodies, opéra, mélodie, lied |
| B1 | Baryton-basse | 51 | chercheur | cours privés (19 ans en tout), choeur (30 ans) | classique, oratorio, musique ancienne |
| B2 | Baryton-basse | 46 | informaticien | cours privé et choeur (20 ans) | plutôt musique ancienne |
| B3 | Baryton-basse (chantante) | 41 | chanteur, chef de choeur | cours privés (7 ans) | médiéval et grégorien. Occasionnellement oratorios, musique baroque |

Tab. 4.1 – *Présentation des chanteurs enregistrés pour le protocole d'étude. Signification des abréviations : CNSM : Conservatoire National Supérieur de Musique, ENM : École Normale de Musique, CNR : Conservatoire National de Région.*

mi2, fa#2, sol#2, la#2, do3, ré3, mi3, fa#3, sol#3, la#3, do4. Chaque chanteur a ainsi été amené à produire des crescendi et decrescendi sur ces notes dans chacun des deux mécanismes laryngés (dans la mesure du possible) et sur chacune des trois voyelles. En mécanisme M2, certains chanteurs (chanteuses) ont effectué des productions sur quelques notes supplémentaires pour aller jusqu'à leur deuxième passage. Ces productions supplémentaires n'ont pas été exploitées dans la thèse. L'étendue exacte explorée au cours de l'enregistrement est précisée, chanteur par chanteur et pour chaque mécanisme laryngé, dans la figure 4.2.

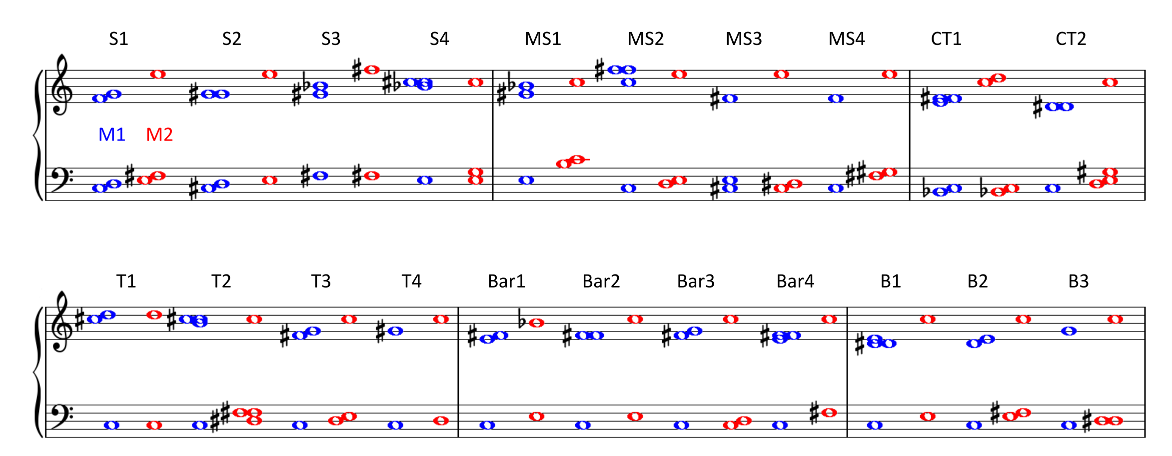



Fig. 4.2 – *Étendue de chaque chanteur, explorée au cours du protocole d'enregistrement, en mécanisme M1 et en M2 (il ne s'agit pas de l'ensemble de leur étendue vocale). Dans certains cas, plusieurs notes (graves ou aigües) sont présentées, il s'agit des limites obtenues pour les différentes voyelles étudiées.*

### 4.3.5 Productions en M0

Immédiatement après chaque crescendo et decrescendo, le chanteur était invité à produire quelques impulsions glottiques dans le mécanisme M0 (fry), en modifiant le moins possible la position articulatoire. Cette procédure vise à permettre une estimation des fréquences formantiques même sur les notes aigües pour lesquelles les méthodes habituelles (le filtrage inverse notamment) sont inefficaces.

### 4.3.6 Déroulement de la séance

À son arrivée, chaque chanteur avait la possibilité de s'échauffer vocalement. Le protocole lui était ensuite décrit. Ce protocole était organisé comme suit : chaque phonétogramme était découpé en quatre parties : le grave et l'aigu de chaque mécanisme laryngé. La note «jonction» entre le grave et l'aigu était habituellement le do3 (262 Hz), il était proposé au chanteur de l'adapter si nécessaire (notamment, elle pouvait ne pas être la même en M1 et en M2). Le protocole consistait ensuite à descendre ton par ton de cette note vers la limite grave, ou de monter vers la limite aigüe, dans le mécanisme laryngé choisi par le chanteur. Cette tâche était réalisée une première fois sur la voyelle /a/, puis sur /o/, puis enfin sur /i/. Ensuite le protocole poursuivait avec une autre des parties. L'ordre de ces parties était choisi par le chanteur. Lorsque le chanteur arrivait sur sa limite grave en mécanisme M1 ou sur sa limite aigüe en mécanisme M2, il avait la possibilité de progresser demi-ton par demi-ton plutôt que ton par ton. Le chanteur avait également la possibilité d'attaquer sa production vocale une tierce ou une quarte au dessus ou au dessous de la note visée, voire d'atteindre la note visée par un petit arpège, ce qui, pour certains d'entre eux, rendait la tâche plus facile. Ces petites vocalises ont été supprimées pour tout traitement postérieur. Enfin, juste avant de commencer le protocole, il lui était expliqué la nécessité des productions en mécanisme M0 suivant chaque crescendo et decrescendo, et le chanteur avait la possibilité de s'entrainer autant que nécessaire pour arriver à modifier la production glottique sans modifier la forme du conduit vocal. Au cours de la séance,

les expérimentateurs pouvaient être amenés à demander au chanteur de reproduire certaines productions si la voyelle n'était pas considérée adéquate ou si le mécanisme laryngé n'était pas le bon (ou était douteux), ou encore si un autre des points du protocole n'était pas respecté. Par ailleurs, si certaines productions pouvaient soulever des discussions relatives à la technique vocale ou au ressenti du chanteur, ces discussions étaient encouragées. Elles n'ont néanmoins pas fait l'objet d'une étude spécifique. La durée d'un enregistrement était donc variable, de 45 minutes à plus de 1 heure et demie.

## 4.4 Traitement des données

Les signaux sonore, EGG et VLP ont été codés sur 16 bits, à 44100 Hz ou 48000 Hz. L'ensemble des données a du être segmenté et étiqueté. Une première segmentation a été effectuée semi-automatiquement sous Praat (après vérification manuelle) et étiquetée, puis corrigée le cas échéant sous Matlab. L'ensemble des calculs et traitements a été effectué sous Matlab.

### 4.4.1 Calibrations

#### Calibration en intensité

Le niveau sonore a été calibré à l'aide d'une production vocale d'intensité «plate», sans vibrato, et émise dans une qualité de voix «parlée». Le niveau de pression a été mesuré à l'endroit du microphone, ce qui nous a permis d'établir le gain de la chaine d'acquisition pour chaque séance.

#### Normalisation du VLP

Le signal de position verticale du larynx est enregistré à partir de l'électroglottographe. Tant que le larynx vibre, le signal EGG est facilement interprétable, mais en l'absence de vibration des cordes vocales, ce n'est plus le cas et il en est de même pour le signal de position du larynx. Le problème est qu'une position de référence habituellement choisie pour le calcul du VLP est la position de repos. La qualité de voix parlée demandée pour la calibration d'intensité visait à encourager le chanteur à maintenir son larynx dans cette position au repos. La production enregistrée permettait donc également de centrer le signal de position du larynx autour de cette valeur, considérée comme valeur de référence. Le VLP est calculé en normalisant le signal de position centré par le maximum de l'excursion obtenue lors de la session.

$$VLP = \frac{Positionlarynx - Positionlarynx_{calibration}}{max(|Positionlarynx - Positionlarynx_{calibration}|)} \times 100$$

Le VLP peut donc prendre des valeurs de -100 à +100, la valeur 0 correspondant à la position de calibration.

### 4.4.2 Identification du mécanisme laryngé utilisé

Nous avons vu dans la partie 1.2 qu'il est habituellement possible d'établir de manière fiable le mécanisme laryngé que le chanteur utilise, en particulier avec l'aide du signal EGG.

Dans la plupart des cas rencontrés, le chanteur ainsi que les expérimentateurs tenaient pour évident le mécanisme utilisé par le chanteur. Mais sur certaines productions, l'identification devenait beaucoup plus délicate. Pour que l'étiquetage en termes de mécanismes laryngés soit correct, une validation était nécessaire. Cette validation a été effectuée en écoutant les sons, et en visualisant le spectrogramme, les courbes d'intensité sonore, de fréquence fondamentale, de quotient ouvert ainsi que l'amplitude du signal EGG. Seules les productions (ou les parties de productions) identifiées comme étant dans le mécanisme laryngé demandé ont été analysées au cours du présent travail.

### 4.4.3 Phonétogrammes de paramètres

Au cours de cette thèse, nous avons cherché à représenter les variations de certains paramètres en fonction de la fréquence et de l'intensité. La méthode choisie consiste à représenter en couleur (ou en niveaux de gris) le paramètre étudié dans le phonétogramme (cf. partie 3.3). Dans la suite du manuscrit, le terme «phonétogramme de X» désignera le graphique représentant en couleur les valeurs que prend le paramètre X en fonction de la fréquence et de l'intensité.

#### Implémentation

L'implémentation de cette représentation est effectuée sous Matlab, et est inspirée des travaux de Pabon & collaborateurs (Pabon et Plomp, 1988; Pabon, 1991, 1993). Son déroulement est schématisé figure 4.3.

Les signaux de fréquence, d'intensité et du paramètre à étudier sont estimés sur l'ensemble de la base de données. Si nécessaire, ils sont rééchantillonnés à un pas de 5 ms. Ensuite, le plan phonétographique est discrétisé par pas de 1 dB * 1 demi-ton. Pour chaque case, la valeur médiane est calculée.

Ensuite, un algorithme détecte les éventuels «trous» dans le phonétogramme, c'est à dire les cases situées à l'intérieur des limites du phonétogramme, mais n'ayant pas de valeur pour le paramètre étudié attribué. Une valeur leur est alors attribuée par linéarisation. Ces trous sont particulièrement présents chez des chanteurs ayant peu de vibrato. En effet le protocole ne prévoit qu'une production tous les tons et non tous les demi-tons. Nous avons néanmoins choisi de garder une discrétisation tous les demi-tons par souci d'homogénéité avec les études antérieures, et pour avoir une discrétisation assez fine en termes de hauteur.

Enfin, la matrice obtenue est sur-échantillonnée d'un facteur deux, pour obtenir une discrétisation de 1/2 dB par 1/4 de ton. Un filtrage médian est appliqué à l'ensemble pour rendre la lisibilité plus aisée.

En définitive, nous obtenons un graphique dont le contour est précis au dB près pour l'intensité et au demi-ton près pour la hauteur. Les valeurs que prend le paramètre étudié sont discrétisées au 1/2 dB par 1/4 de ton près. La finalité de cette procédure n'est pas d'extraire des données objectives étudiables telles quelles par un traitement statistique, mais de nous fournir une représentation de l'évolution du paramètre étudié en fonction de la hauteur et de l'intensité.

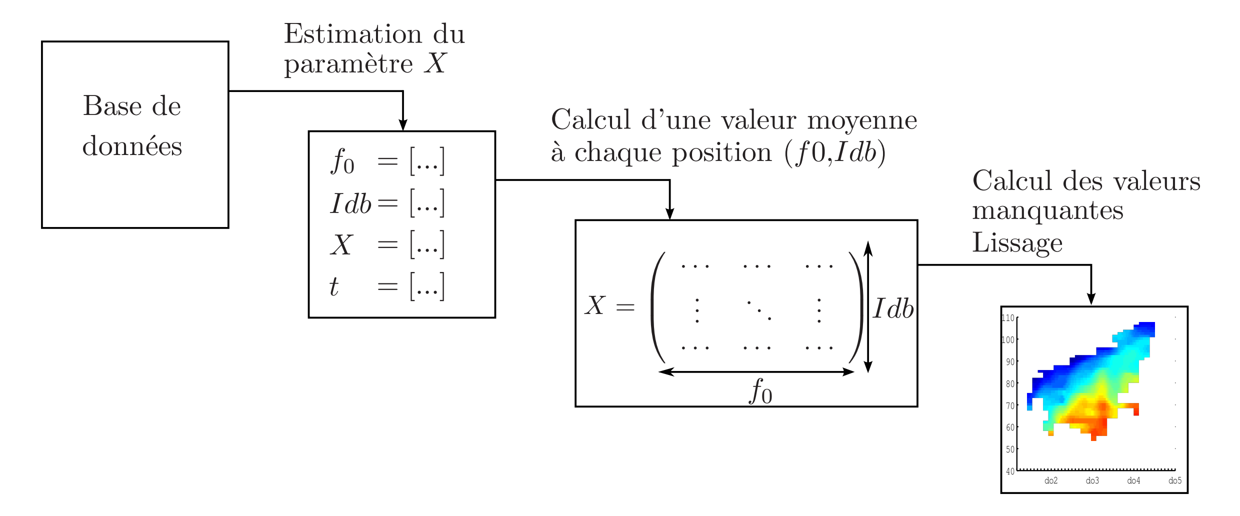



Fig. 4.3 – *Schématisation de la démarche pour établir les phonétogrammes de paramètres.*

## 4.5 Le questionnaire

À l'issue de la séance d'enregistrement, nous avons remis à chaque chanteur le questionnaire dont la première partie est retranscrite ci-dessous (la seconde partie a été présentée dans la partie

2.3). Nous avons demandé au chanteur de le remplir assez rapidement et de nous le renvoyer. Ce questionnaire a deux objectifs principaux : d'une part, de recueillir les critiques des chanteurs vis-à-vis du protocole lui-même, d'autre part, d'obtenir des informations quant à la perception que le chanteur a des mécanismes laryngés et quant au rôle de la voyelle dans cette perception. L'étude de ce corpus verbal doit permettre de confirmer ou d'infirmer des discussions privées effectuées avec quelques chanteurs (et a été présenté dans la partie 2.3). Nous allons maintenant présenter la première partie du questionnaire qui nous a permis d'effectuer une critique du protocole expérimental. Nous discuterons donc de la validité écologique du protocole.

La première partie du questionnaire se présente ainsi :

Nom : Prénom :

Date de réponse du questionnaire :

Connaissiez-vous la terminologie des mécanismes laryngés ?

*Suite à la séance d'enregistrement, vous aurez constaté qu'au laboratoire, nous employons les termes de mécanismes laryngés. Si vous n'êtes pas familier avec cette terminologie, vous pouvez remplacer M1 par «registre de poitrine» et M2 par «registre de tête» (peut-être plutôt pour les femmes) ou «falsetto» (plutôt pour les hommes) dans la suite du questionnaire. Cependant, vous vous souviendrez qu'ils ne sont pas rigoureusement équivalents.*

Questions proches du protocole :

- A-t-il été fatiguant ? Trop long ?
- Le fry vous a-t-il perturbé ?
- Avez-vous pris conscience de quelque chose par rapport aux voyelles et/ou aux mécanismes laryngés ? Si oui, de quoi ?
- Avez-vous été à l'aise sur toute la tessiture et dans les deux mécanismes ? Sur quelles notes et quelles nuances avez-vous des doutes quant au mécanisme utilisé ?
- Quand vous chantez, votre perception (ou ressenti) du mécanisme utilisé change-t-il avec la voyelle ?
- Êtes-vous satisfait de votre enregistrement ? Si ce n'est pas le cas, qu'est ce qui vous a gêné ?
- L'enregistrement vous a-t-il intéressé ? Si oui, en quoi ?

Nous avons recueilli en tout 16 questionnaires. Les chanteurs n'ayant pas rendu leur questionnaire sont T2, T3, Bar2, Bar4, B1 et B3. Nous avons en outre recueilli le questionnaire d'un ténor supplémentaire, que l'on appellera T5, qui ne figure pas dans la liste des chanteurs. Nous n'avons pas pris en compte son enregistrement car il n'a pas réussi à chanter en mécanisme M2, et donc ne nous permet pas de comparer l'influence de la voyelle sur les phonétogrammes en M1 et M2. Néanmoins nous avons conservé son questionnaire que nous avons dépouillé. T5 est un chanteur semi-professionnel.

Nous nous proposons maintenant de présenter les analyses que nous avons effectuées à partir

de cette partie de questionnaire. De même que pour deuxième partie du questionnaire étudiée en section 2.3, cette analyse a été effectuée en collaboration à l'équipe LCPE du LAM.

**Analyse du questionnaire**

Parmi les 16 chanteurs ayant répondu au questionnaire, 8 l'ont trouvé fatiguant. Citons notamment S4, qui a trouvé le protocole *éprouvant et demandant beaucoup de concentration*, ou T1 qui déclare que *personnellement cela a été mais il ne fallait pas 20 minutes de plus sur ce genre d'exercice. Au delà, je pense qu'on peut se faire mal.* 3 seulement l'ont trouvé trop long. Ce résultat montre que les chanteurs ont très bien perçu l'exigence du protocole consistant à les pousser aux limites de leurs capacités en termes d'intensité, ce qui leur impose un certain décalage par rapport à leur pratique habituelle. Pour 12 chanteurs, les productions de M0 n'ont pas été dérangeantes, certains chanteurs les ayant même appréciées comme S3 qui mentionne une *sensation de massage pour les cordes* à leur propos.

En terme de compatibilité entre leur pratique ordinaire et leur expérience liée au protocole d'enregistrement, 5 chanteurs énoncent de manière plus ou mois explicite (de façon plus ou moins directe) le caractère non musical de l'enregistrement. Citons Bar1 : *ce qui est intéressant c'est l'éloignement de ce type de production de celles réalisées dans un contexte musical*, ou MS3 : *Ce qui m'a le plus gêné c'est finalement... de ne pas chanter.* Ces chanteurs mettent en évidence le fait que le protocole n'était pas valide écologiquement, car il ne contenait pour les chanteurs aucune exigence musicale (artistique). Il s'agissait de tester leurs limites physiologiques, et non leur aptitude artistique. Les chanteurs ont donc répondu aux contraintes de l'expérience en mettant en oeuvre des gestes vocaux qui ne sont pas nécessairement représentatifs de leur pratique quotidienne.

Outre des difficultés mentionnées dans la partie précédente, 12 des 16 chanteurs ont exprimé des difficultés par rapport au protocole. Parmi les hommes, Bar1, Bar3, B2, T1 (chanteurs de M1) et CT1 (chanteur de M2 principalement) se sont plaints de difficultés pour produire les sons pianissimo dans le mécanisme qu'ils utilisent. CT2 (chanteur de M2) et T5 (chanteur de M1) ont mentionné la difficulté de chanter dans le mécanisme qu'ils n'utilisent pas. Parmi les femmes (chanteurs de M2), S2, S4 et MS3 se sont plaintes de difficultés en mécanisme M1. MS3 mentionne même : *Je m'appuyais comme une malade sur le larynx pour produire un son qui, d'après l'oscillo, correspondait à un M1 et j'ai d'ailleurs eu mal plusieurs jours après !* Cette remarque souligne à nouveau le décalage entre une exigence contrainte par la logique de description des phénomènes physiques, et une logique de la pratique artistique du chant.

**Conclusion**

Nous avons observé une distance entre le protocole d'enregistrement et la pratique artistique des chanteurs. La base de données enregistrée est donc constituée de productions vocales chantées, partiellement décontextualisées, donc partiellement en dehors de la pratique vocale habituelle de certains chanteurs.

Il est probable que si l'expérience était reproduite plusieurs fois ou que les chanteurs y étaient préparés, les résultats changeraient, peut être de façon notable pour certains d'entre eux. Ces constatations ouvrent néanmoins la possibilité d'une réflexion pour établir des protocoles plus écologiques pour les chanteurs, satisfaisant à la fois aux contraintes liées à leur nécessité d'interprétation et à celles liées aux impératifs d'une étude scientifique.

## 4.6 Bilan du chapitre

Nous avons enregistré une base de données de phonétogrammes par mécanismes laryngés (M1 et M2) et par voyelles (/a/, /i/ et /o/). Cette base nous permet de comparer l'influence de la voyelle en M1 et en M2 sur les contours phonétographiques, ainsi que sur les paramètres spectraux (répartition de l'énergie dans le spectre) et de source (Amplitude de l'EGG, VLP, $O_q$) que nous avons choisis.

– 21 chanteurs, professionnels ou amateurs avancés, ont participés à l'étude (8 femmes et 13

hommes).
- La tessiture explorée est la zone commune aux mécanismes M1 et M2 (de do2 à do4).
- Les deux mécanismes et les trois voyelles sont enregistrés successivement (six phonétogrammes par chanteur en tout).
- Les chanteurs ont effectué des crescendi et decrescendi, ton par ton.
- Chacune de ces productions est suivie par quelques impulsions produites en M0 en maintenant la forme du conduit vocal, pour permettre une estimation formantique fiable.
- Les chanteurs ont rempli un questionnaire à l'issue du test, leur permettant de commenter la séance. Pour plusieurs chanteurs, le protocole s'est révélé éloigné de leur pratique vocale.

# Chapitre 5

# Voyelles et limites phonétographiques

Dans ce chapitre nous présentons les limites phonétographiques calculées sur la base de données ainsi que les écarts types observés sur ces limites, en fonction de la hauteur, de l'intensité, de la voyelle et du mécanisme laryngé.

## 5.1 Incidence de la voyelle sur les limites phonétographiques

Les phonétogrammes par voyelle et par mécanisme ont été établis pour chaque chanteur. Des phonétogrammes moyennés sur tous les hommes d'une part et toutes les femmes d'autre part sont présentés au cours de cette section. Pour chaque ton, l'effectif minimal est de 30% du nombre de chanteurs par catégorie (soit 4 pour les hommes et 3 pour les femmes). Les phonétogrammes, détaillés pour chaque chanteur, sont disponibles en annexe B.

### 5.1.1 Phonétogrammes par mécanisme et voyelle: résultats généraux

La figure 5.1 montre les phonétogrammes moyens, présentés séparément en fonction du sexe, du mécanisme laryngé et de la voyelle. Les phonétogrammes moyens des hommes sont présentés sur la colonne de gauche, ceux des femmes sur la colonne de droite. Les deux mécanismes laryngés ont également été séparés pour une meilleure lisibilité. Ainsi sur chacun des 4 diagrammes sont représentées les trois limites supérieures et inférieures des phonétogrammes moyens pour chacune des trois voyelles étudiées.

**Tessiture représentée**

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 4 ces phonétogrammes sont partiels : ils ne représentent pas la totalité de la tessiture des chanteurs. Le phonétogramme du mécanisme M1 des hommes ne décrit que le médium-aigu de leur tessiture dans ce mécanisme, et les phonétogrammes du mécanisme M2 correspondent à la partie grave des possibilités vocales, pour les hommes comme pour les femmes, dans ce mécanisme. En revanche en mécanisme M1, moins de 30% des femmes ont réussi à produire les crescendos et decrescendos à des fréquences inférieures à celle du do2 et supérieure à celle du do4. En conséquence, les phonétogrammes moyennés des femmes en M1 représentent la totalité de leur tessiture dans ce mécanisme laryngé.

**Zone de recouvrement**

Un premier élément fondamental à remarquer est que la zone de recouvrement des mécanismes laryngés est considérable : elle est d'une octave et demie à deux octaves. Au moins 9 des 13 hommes ont une tessiture qui monte jusqu'au sol#3 (415 Hz) en M1 sur deux des trois voyelles, et descend jusqu'au do2 (131 Hz) ou ré2 (147 Hz) en M2, soit une octave et demie de commun aux deux mécanismes. La tessiture moyenne des femmes s'étend du do2 (131 Hz) au sib3 (466 Hz) ou au do4 (523 Hz) en M1, et descend jusqu'au ré2 (147 Hz) ou au mi2 (165 Hz) en M2, soit

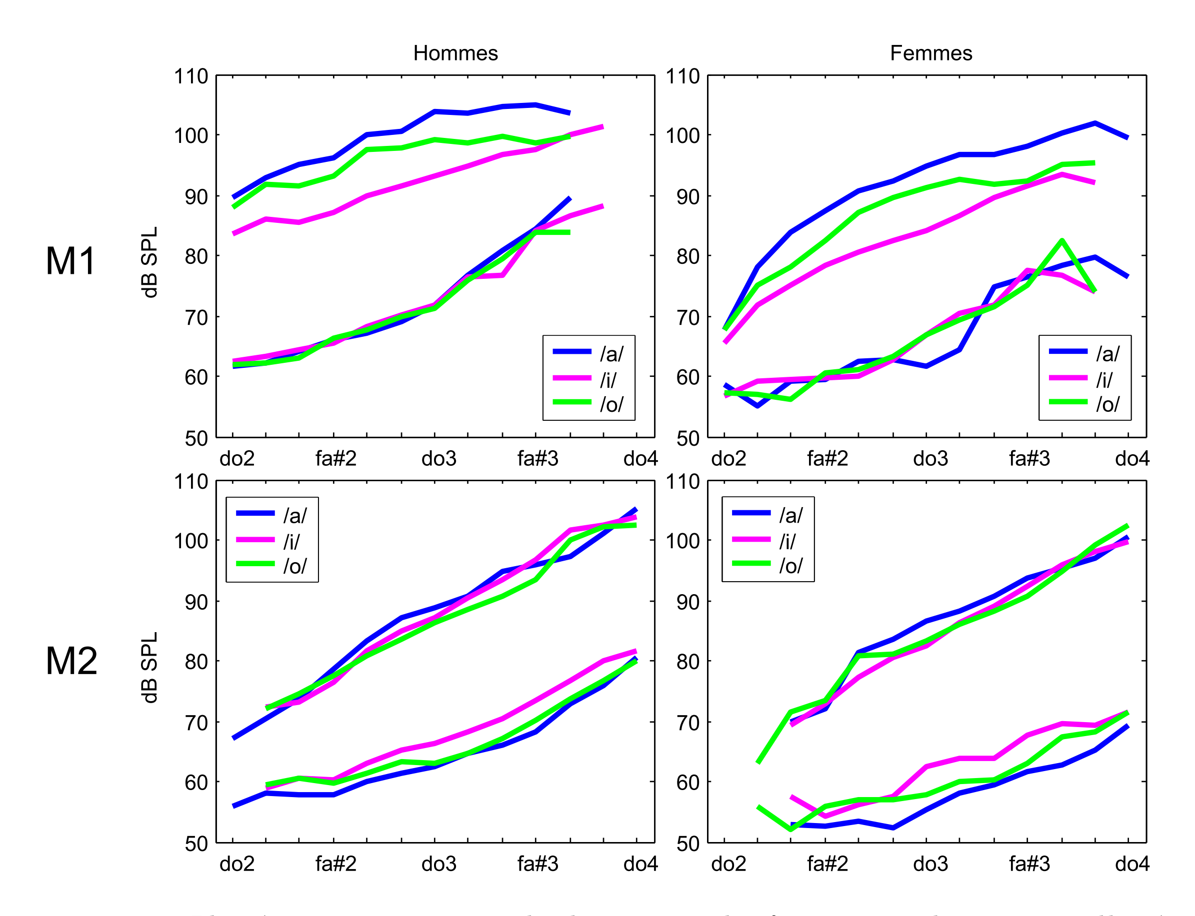



Fig. 5.1 – *Phonétogrammes moyens des hommes et des femmes, sur les trois voyelles étudiées, et pour les mécanismes laryngés M1 et M2.*

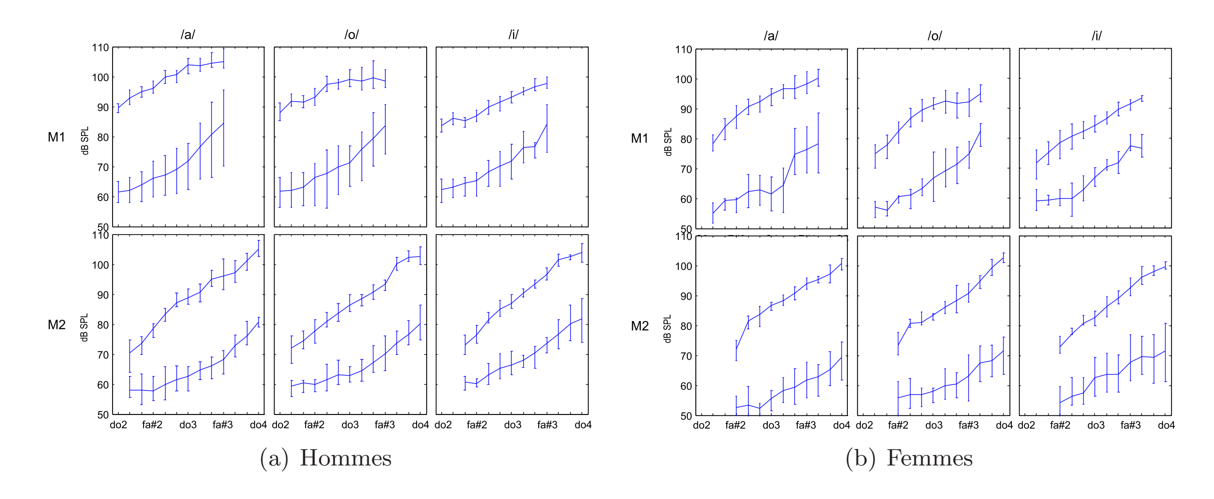



Fig. 5.2 – *Phonétogrammes moyens et intervalles interquartiles pour les deux mécanismes et les trois voyelles.*

une octave et une sixte de commun aux deux mécanismes. Outre les considérations de voyelles, l'étendue de la zone commune est proche de celle obtenue par Roubeau *et al.* (2004), pour 21 hommes et 21 femmes, à savoir du ré#2 au fa#3 pour les hommes et du fa#2 au sol3 pour les femmes. La différence la plus notable porte sur la note la plus aigüe du mécanisme M1 chez les femmes, qui est une tierce plus haute dans notre étude que dans la leur.

**Fréquence et SPL sont corrélés**

Sur chacun des quatre diagrammes de la figure 5.1 nous constatons que le niveau SPL des limites inférieure et supérieure augmente avec la fréquence, ce qui traduit la corrélation entre SPL et fréquence, que l'on retrouve sur tous les phonétogrammes et qui est bien connue (Titze, 1992; Sulter *et al.*, 1995; Henrich *et al.*, 2005; Pabon, 1991). Les ordres de grandeur (en dB) des limites sont aussi conformes aux études précédentes : sur la tessiture étudiée, les limites supérieures vont de 85 à 105 dB pour les hommes en M1, de 70 à 100 dB pour les femmes en M1, et de 70 à 100 dB pour les hommes comme pour les femmes en M2. Globalement, à fréquence donnée, les sons produits en mécanisme M2 sont donc moins forts que ceux produits en mécanisme M1.

**Incidence des voyelles sur les phonétogrammes**

Le résultat le plus marquant de cette étude porte sur la différence d'influence de la voyelle selon le mécanisme. En mécanisme M1 : la limite supérieure des phonétogrammes sur /a/ est décalée de 10 dB vers les forts niveaux SPL par rapport à celle sur /i/. La limite sur le /o/ est proche de la limite du /a/ dans le grave (en dessous de ré3), et de celle sur /i/ dans l'aigu (au dessus de mi3). Ces tendances sont identiques chez les hommes et chez les femmes. Par contre, ces variations de la limite supérieure avec la voyelle sont totalement absentes en mécanisme M2, aussi bien chez les hommes que chez les femmes. Par ailleurs, les limites inférieures des phonétogrammes en M1 comme en M2 ne semblent pas varier avec la voyelle.

Nous avons évalué la significativité statistique des tendances observées à l'aide d'un test ANOVA. La voyelle a une influence statistiquement significative sur la limite supérieure du phonétogramme de M1, mais une influence non significative sur les autres limites (limite supérieure du M2 et limites inférieures en M1 et en M2), chez les hommes comme chez les femmes (pour les détails des analyses statistiques, voir annexe A, tableaux A.1 à A.4, p. 159 à 161).

**Variabilité des limites**

Les figures 5.2(a) et 5.2(b) présentent les limites phonétographiques moyennes sur les trois voyelles et les deux mécanismes (comme sur la figure 5.1, mais dans une disposition différente) ainsi que les variabilités inter-sujets, pour chaque note de la tessiture. Globalement, les intervalles interquartiles sont de l'ordre de 5 dB sur les limites supérieures, indépendamment de la voyelle, du mécanisme et de la fréquence d'émission. En revanche, les variabilités sont plus importantes sur les limites inférieures, allant de 4 à 15 dB environ, avec des pointes à plus de 25 dB comme sur /a/ en M1 vers sol#3 (hommes comme femmes). En M1, les limites inférieures sont plus variables sur /a/ que sur /i/ et que sur /o/ dans une moindre mesure. En M2, la voyelle ne semble pas avoir d'influence sur la variabilité des limites. Enfin, la variabilité des limites inférieures augmente avec la fréquence d'émission pour les hommes et pour les femmes (excepté pour les hommes en M2).

Nous pouvons en conclure que l'influence de la voyelle sur la limite supérieure des phonétogrammes n'est pas la même pour le mécanisme M1 que pour le mécanisme M2.

### 5.1.2 Comparaison des phonétogrammes par mécanismes, pour les trois voyelles séparément

La figure 5.1 est composée de quatre graphiques présentant, en M1, en M2, pour les hommes et les femmes, l'influence de la voyelle sur les phonétogrammes. Sur la figure 5.3, nous observons

désormais, pour les hommes et les femmes, les phonétogrammes de M1 et M2 sur le même graphique, en prenant séparément les trois voyelles. Cette figure permet de visualiser directement les positions relatives des phonétogrammes de M1 et de M2.

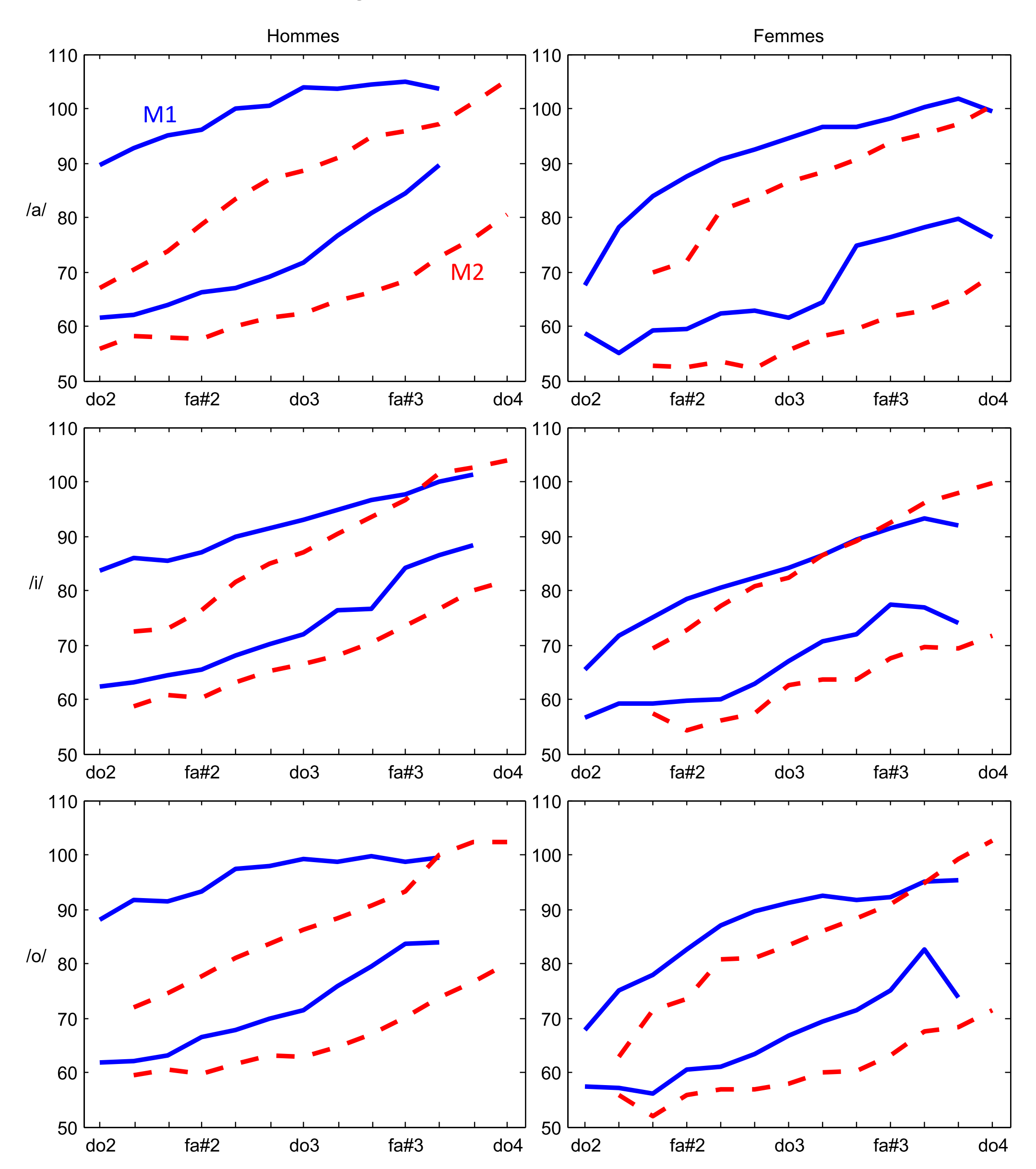



Fig. 5.3 – *Phonétogrammes moyens des hommes et des femmes, sur les trois voyelles étudiées, et pour les mécanismes laryngés M1 et M2. Les données sont les mêmes que celles présentées figure 5.1, mais ici elles sont représentées pour les trois voyelles séparément.*

Pour les trois voyelles étudiées, les phonétogrammes de mécanisme M2 sont globalement translaté vers des niveaux plus bas que ceux de mécanisme M1. Sur ces phonétogrammes moyens, et sur l'ensemble de la zone de recouvrement, la limite inférieure du mécanisme M2 est toujours à un niveau inférieur de celui de la limite inférieure du mécanisme M1. En ce qui concerne la limite supérieure, sur la voyelle /a/ nous observons un décalage bien marqué entre la limite supérieure de mécanisme M1 et celle de M2 chez les hommes. Cette différence est un peu plus faible chez les femmes. Il est intéressant de constater que sur les voyelles /i/ et /o/, les limites supérieures des phonétogrammes de mécanisme M1 et M2 se croisent, c'est-à-dire que dans l'aigu, les productions fortissimo de mécanisme M2 sont plus intenses que celles de M1.

Une étude complémentaire basée sur les enregistrements de 18 des 21 chanteurs (Lamesch *et al.*, 2008) a montré que la différence de limite supérieure entre les mécanismes M1 et M2 est statistiquement significative sur les deux octaves étudiées sur la voyelle /a/, mais l'est seulement jusqu'au mi3 sur /o/ et jusqu'au do3 sur /i/. Pour le chanteur, ce résultat a une conséquence

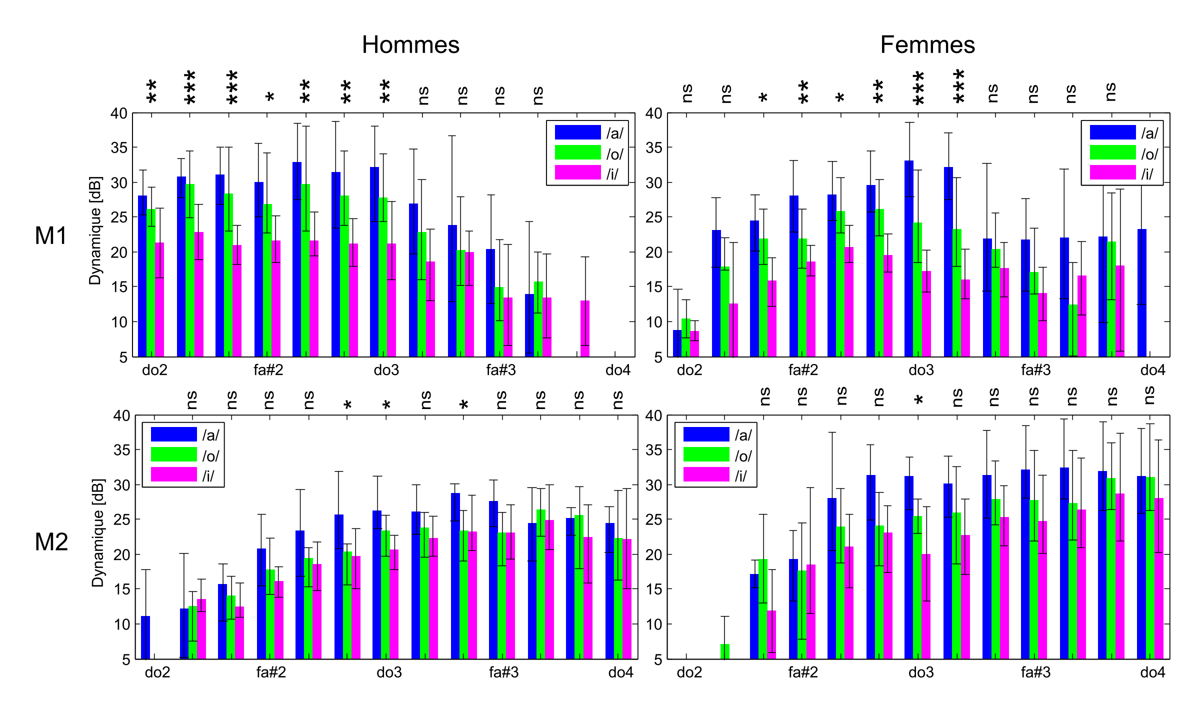



FIG. 5.4 – *Dynamique moyenne des 21 chanteurs étudiés, sur les trois voyelles, et les deux mécanismes. Les intervalles de confiance sont tracés en noir et les résultats des tests de significativité de l'influence de la voyelle sont inscrits au dessus des graphiques (Détails des tests en annexe A, tableaux A.5 et A.6, p. 161 et 162).*

assez importante : la différence entre les mécanismes M1 et M2, en termes d'intensité SPL, est globalement plus importante sur la voyelle /a/ que sur la voyelle /o/, et à plus forte raison que sur la voyelle /i/.

## 5.2 Données quantitatives sur la dynamique, sur l'aire phonétographique et sur les pentes phonétographiques

### 5.2.1 Dynamique

La dynamique vocale a été estimée, pour chaque chanteur, par la différence de niveau entre les limites supérieures et inférieures, pour chaque fréquence étudiée. La figure 5.4 présente la dynamique vocale moyenne obtenue pour les hommes (colonne de gauche) et les femmes (colonne de droite), dans les deux mécanismes laryngés, et sur les trois voyelles. Elle montre en particulier une diminution de la dynamique dans l'aigu du M1 (surtout chez les hommes) et dans le grave du M2, illustrant ainsi que la tessiture étudiée correspond à l'aigu du mécanisme M1 et au grave du mécanisme M2. La dynamique est de l'ordre de 25 à 30 dB, en M1 comme en M2, sur des notes que les chanteurs émettent aisément (à partir du do3 pour les femmes en M2, par exemple).

Concernant l'effet de la voyelle, nous pouvons constater que la dynamique est toujours plus importante sur /a/ que sur /o/ et /i/, que ce soit en M1 ou en M2. En mécanisme M1, cette différence est statistiquement significative de mi2 à ré3 pour les femmes, et de do2 à do3 pour les hommes. Les différences de dynamique dues aux voyelles sont plus faibles en M2 et sont globalement non significatives pour les hommes comme pour les femmes. Nous pouvons établir un parallèle entre ces niveaux de significativité et les résultats présentés (partie 5.1) sur les limites des phonétogrammes : dans la partie précédente, nous avons vu que les limites des phonétogrammes variaient en fonction de la voyelle en M1 et pas en M2. Nous retrouvons cette incidence de la voyelle à travers l'étude de la dynamique.

### 5.2.2 Aires des phonétogrammes

Le tableau 5.1 donne les valeurs d'aires mesurées, en dB*demi-ton, par sexe, par mécanisme et par voyelle. Les valeurs présentées sont difficilement interprétables en l'état, puisque les phonétogrammes ne sont que partiels. En revanche, les différences d'aires dues aux voyelles, ou au sexe, peuvent être discutées. Dans les deux mécanismes, les aires obtenues sont plus importantes sur /a/ que sur /i/ et /o/, mais cette différence n'est statistiquement significative que pour le mécanisme M1. En moyenne, les phonétogrammes sur /i/ ne font que 67,9 % (écart type : 11,1 %) des phonétogrammes de /a/ en M1, et 82,3 % (écart type : 18,9 %) en M2 ; et les phonétogrammes de /o/ 85,3 % (écart type : 12,6 %) en M1 et 89,7 % (écart type : 13,1 %) en M2.

| | Hommes | | Femmes | |
|---|---|---|---|---|
| | M1 | M2 | M1 | M2 |
| /a/ | 553 (163) | 527 (113) | 512 (145) | 533 (177) |
| /i/ | 385 (116) | 437 (96) | 329 (105) | 421 (168) |
| /o/ | 486 (142) | 470 (101) | 409 (116) | 474 (169) |
| | * | ns | * | ns |

Tab. 5.1 – *Moyennes (écarts types) des aires des phonétogrammes partiels en M1 et M2, sur les trois voyelles (en dB*demi-ton), et niveau de significativité de l'influence de la voyelle (Détails des tests en annexe A, tableau A.7 p. 162).*

### 5.2.3 Pentes des phonétogrammes

Les pentes des phonétogrammes et de leurs limites supérieures ont été estimées par mécanisme laryngé, sur les trois voyelles séparément, pour les hommes et pour les femmes, par la méthode des moindres carrés. Les valeurs moyennes et écarts types obtenus sont présentés dans les tableaux 5.2 et 5.3.

Les valeurs mesurées des pentes des phonétogrammes sont de l'ordre de 13 dB/Oct en M1 et de 14,5 dB en M2 (tableau 5.2). Ces valeurs sont assez similaires pour les hommes et les femmes, bien que le mécanisme ait une influence statistiquement peu significative pour les hommes, et pas significative pour les femmes. L'influence de la voyelle n'est significative ni pour les hommes, ni pour les femmes, que ce soit en mécanisme M1 ou en mécanisme M2.

En revanche, les valeurs des pentes de la limite supérieure (tableau 5.3) varient fortement selon le mécanisme : elles sont de l'ordre de 9 dB/Oct pour les hommes et de 13 dB/Oct pour les femmes en M1, et de 18 dB/Oct pour les hommes et les femmes en M2. Le mécanisme a une influence statistiquement très significative sur la pente de la limite supérieure chez les hommes et chez les femmes. En ce qui concerne les voyelles, les différences ne sont pas significatives. On peut néanmoins constater que les pentes de la limite supérieure des phonétogrammes de /o/, en M1, sont légèrement plus faibles que celles de /i/ et de /a/ en M1. Ce résultat est visible sur la limite supérieure des phonétogrammes moyens (cf. figure 5.1).

| | Hommes | | | Femmes | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | M1 | M2 | | M1 | M2 | |
| /a/ | 14,1 (3,7) | 15,0 (3,3) | | 13,5 (4,7) | 13,6 (2,5) | |
| /i/ | 13,0 (2,8) | 15,7 (3,9) | | 13,7 (3,1) | 14,5 (3,9) | |
| /o/ | 12,2 (4,1) | 14,3 (3,1) | | 12,9 (2,7) | 14,3 (4,0) | |
| Moyenne | 13,1 (3,6) | 15,0 (3,4) | * | 13,4 (3,5) | 14,2 (3,4) | ns |
| | ns | ns | | ns | ns | |

Tab. 5.2 – *Pentes moyennes (écarts types) des phonétogrammes, en dB/Oct, par sexe, par mécanisme et par voyelle (Détails des tests en annexe A, tableaux A.8 et A.9 p. 163).*

| | Hommes | | | Femmes | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | M1 | M2 | | M1 | M2 | |
| /a/ | 10,3 (2,5) | 18,2 (4,1) | | 13,4 (4,3) | 16,9 (3,2) | |
| /i/ | 9,9 (2,4) | 18,7 (2,7) | | 14,1 (4,8) | 18,9 (2,4) | |
| /o/ | 8,0 (3,2) | 17,4 (2,6) | | 12,2 (4,4) | 18,9 (3,0) | |
| Moyenne | 9,4 (2,8) | 18,1 (3,2) | *** | 13,2 (4,4) | 18,2 (2,9) | *** |
| | ns | ns | | ns | ns | |

Tab. 5.3 – *Pentes moyennes (écarts types) de la limite supérieure des phonétogrammes, en dB/Oct, par sexe, par mécanisme et par voyelle (Détails des tests en annexe A, tableaux A.10 et A.11 p. 163).*

Les deux estimations de pente donnent des valeurs très différentes. Utiliser l'une plutôt que l'autre n'est donc pas un choix anodin. Leur intérêt n'est pas équivalent, ni leur fiabilité. Comme nous l'avons vu, la limite inférieure est plus variable que la limite supérieure, en conséquence la pente moyenne des phonétogrammes est également plus variable (et vraisemblablement moins stable) que la pente de la limite supérieure seule.

## 5.3 Discussion

Dans cette partie, les principaux résultats de cette étude sont discutés et mis en rapport avec ceux de la littérature. Comme nous allons le voir, ce dernier point s'avère particulièrement délicat en raison de la grande diversité des méthodes d'étude, et plus particulièrement du fait que la plupart des études ne prennent pas en compte la distinction des mécanismes laryngés. Ne disposant pas des informations permettant d'attester du mécanisme utilisé, nous serons dans l'obligation de faire des hypothèses sur le mécanisme utilisé.

### 5.3.1 Influence de la voyelle

Le résultat majeur du présent travail est le fait que l'influence de la voyelle sur les contours des phonétogrammes est différente selon le mécanisme de production laryngée. En M1, la limite supérieure du phonétogramme de la voyelle /a/ est supérieure de 10 dB par rapport à /i/, alors que la limite inférieure n'est globalement pas modifiée. Ces deux phénomènes impliquent une augmentation statistiquement significative de la dynamique pour les hommes et les femmes et une augmentation de l'aire des phonétogrammes, ce qui signifie que la variabilité due à la voyelle est très supérieure à la variabilité inter-sujets. Le plus inattendu est que nous n'observions pas d'influence de la voyelle en mécanisme M2, ni sur les limites des phonétogrammes, ni sur la dynamique, ni sur les aires.

Nous constatons que notre étude permet d'interpréter en termes de mécanismes laryngés la diversité des résultats quant à l'influence de la voyelle sur les limites phonétographiques, que nous avons relevée dans la partie 3.4.2. La différence de 10 dB que nous relevons en mécanisme M1 sur les limites supérieures est en accord avec les résultats observés chez les hommes et chez les femmes dans le grave de leur tessiture. Le fait que les femmes chantent en mécanisme M2 dans les parties medium et aigües de leur tessiture s'accorde avec l'absence d'influence de la voyelle observée sur les phonétogrammes de M2.

Les différences d'influence de la voyelle sur les limites phonétographiques relevées entre les hommes et les femmes semblent donc plus liées à des différences d'utilisation des mécanismes laryngés qu'à la différence de sexe.

**Développement acoustique**

Tentons, dans le cadre de la théorie source-filtre linéaire, de comprendre ces résultats.

Les variations de SPL en fonction des voyelles sont habituellement expliquées par deux facteurs, se ramenant essentiellement à la fréquence du premier formant (F1) : si la fréquence

du premier formant (F1) augmente, le niveau de l'énergie située en hautes fréquences augmente, et donc le SPL augmente à son tour (Fant *et al.*, 1963). Par ailleurs, quand F1 est proche d'un harmonique, l'énergie de cet harmonique augmente (phénomène de formant tuning), ce qui implique également une augmentation de SPL (Gramming et Sundberg, 1988; Fant *et al.*, 1963; Sundberg *et al.*, 1993). Sur /a/ le F1 est plus élevé que sur /i/ et /o/, nous pouvons donc nous attendre à mesurer des niveaux SPL supérieurs sur /a/ à ceux des autres voyelles étudiées, ce qui est cohérent avec nos résultats obtenus en mécanisme M1.

Pour expliquer nos résultats obtenus en mécanisme M2, il semble nécessaire de prendre en compte les différences à la source entre le mécanisme M1 et M2. Nous verrons dans la partie 6.4 dans quelle mesure des différences à la source permettent d'expliquer les différences de limites supérieures observées.

Au niveau de la limite inférieure, le niveau sonore est très faible et le spectre très pauvre. Concrètement, cela signifie que la quasi-totalité de l'énergie se trouve dans le premier harmonique (Gramming, 1991). Au niveau du filtre résonantiel, nous en déduisons que l'influence de la voyelle sur l'intensité totale ne dépend que de l'éloignement de la fréquence du premier formant avec la fréquence fondamentale. Pour un signal de source donné, sur la voyelle /i/ le premier formant est proche de la fréquence fondamentale sur le /i/, alors qu'il est éloigné sur le /a/. En conséquence le niveau minimal devrait être plus grand sur /i/ que sur /a/. Or nous n'observons pas cette tendance.

Notre étude montre que la voyelle n'est pas un paramètre de premier ordre faisant varier la limite inférieure des phonétogrammes. La variabilité inter-sujet est plus grande. Une étude complémentaire pourrait consister à étudier la variabilité intra-sujet par rapport à la variabilité due à la voyelle sur la limite inférieure. Nous rediscuterons des questions de variabilité dans la partie 5.3.4.

### 5.3.2 Étude en fonction du genre

L'influence des voyelles est proche pour les hommes et pour les femmes si l'on étudie, pour chacun, les mécanismes séparément. Deux points méritent d'être discutés, en lien avec la tessiture étudiée et avec l'entraînement vocal.

#### Phonétogrammes globaux / tessiture

Par rapport aux phonétogrammes des hommes, ceux des femmes sont globalement décalés de 10 dB vers le bas (cf. figure 5.1). Ce résultat, déjà montré par Roubeau *et al.* (2004), ne vaut que pour la tessiture commune aux deux sexes, celle qui correspond à l'aigu des hommes, et au grave des femmes. Sulter *et al.* (1995) ont effectué des phonétogrammes complets d'hommes et de femmes, qu'ils ont également normalisés en fréquence (*rescaling method*). Compte tenu d'une pente moyenne de 14 dB/oct (cf. partie 5.2.3), l'écart moyen de 10 dB entre les phonétogrammes des hommes et ceux des femmes correspond à un décalage moyen de la tessiture de 8 demi-tons environ, ce qui est conforme aux résultats moyens obtenus sur des phonétogrammes complets.

#### Aires / entraînement vocal

L'aire des phonétogrammes de mécanisme M2 est plus importante chez les femmes que chez les hommes, et inversement pour ceux de M1. Il en est de même pour la dynamique. Cette remarque a déjà été relevée par Roubeau *et al.* (2004), qui avaient proposé une justification en termes d'entraînement vocal. Tous les chanteurs enregistrés sont des chanteurs confirmés ou professionnels, mais les pratiques vocales varient beaucoup en fonction de la tessiture des chanteurs. La plupart des hommes (à l'exception des contre-ténors) n'utilisent que le mécanisme M1, alors que certaines femmes utilisent les deux en privilégiant le M2, et que certaines sopranos n'utilisent probablement que le M2. L'entraînement vocal amène donc, dans bien des cas, à favoriser l'emploi d'un mécanisme par rapport à l'autre, à savoir le mécanisme M1 pour les hommes et le mécanisme M2 pour les femmes. Sans aller jusqu'à considérer que le travail d'un mécanisme n'a aucune influence sur l'autre, on peut quand même supposer que le M1 est moins

entraîné que le M2 pour les femmes, et que le M2 l'est moins pour les hommes. Les différences d'aires mesurées seraient alors simplement dues à des différences d'entraînement vocal.

### 5.3.3 Influence des mécanismes sur...

#### les phonétogrammes

La plupart des auteurs repèrent les transitions d'un type d'émission vocale à un autre (qu'il s'agisse de mécanismes laryngés ou de registres) sur les phonétogrammes par une inflexion de la limite supérieure (Sulter *et al.*, 1994; Klingholz et Martin, 1983; Schutte, 1980; Calvet et Malhiac, 1952). Roubeau *et al.* (2004) ont montré que cette inflexion est due au décalage vers les bas niveaux SPL du phonétogramme de M2 par rapport à celui de M1 quand les phonétogrammes sont enregistrés sur la voyelle /a/. Nous avons vu dans la section 5.1.2 que ce résultat n'est valable que sur la voyelle /a/. En conséquence cette méthode d'explication a posteriori des inflexions de la limite supérieure nous semble peu souhaitable pour identifier le mécanisme laryngé utilisé lors de l'enregistrement. Il est vraisemblable qu'il en soit de même à propos du registre dans la mesure où, comme pour les mécanismes, il peut exister des zones de recouvrement dans le plan phonétographique. Un critère de substitution pour identifier le mécanisme utilisé peut alors être la pente de la limite supérieure, mais l'idéal reste d'identifier le mécanisme (ou le registre vocal) lors de l'enregistrement ou, production par production, à partir de l'étude de différents signaux (sonores et électroglottographiques par exemple).

#### les pentes des phonétogrammes

Les pentes estimées n'ont pas montré de dépendance à la voyelle, mais varient en fonction du mécanisme, surtout la pente de la limite supérieure des phonétogrammes. Ces pentes suggèrent que la corrélation entre la fréquence d'émission et le SPL n'est pas la même en fonction du mécanisme laryngé utilisé. Les valeurs des pentes des phonétogrammes sont globalement cohérentes avec celles présentées dans la littérature. Sulter *et al.* (1995) ont étudié la pente de phonétogrammes moyens de femmes et d'hommes entraînés et non entraînés. Pour des sujets entraînés, ils obtiennent 11.3 dB/oct pour les hommes et 11.9 dB/oct pour les femmes, valeurs qui sont légèrement plus faibles que les nôtres. Ces différences peuvent être attribuées au fait que notre étude porte sur des phonétogrammes partiels et par mécanisme laryngé.

Klingholz et Martin (1983) ont établi des phonétogrammes moyens d'hommes et de femmes entraînés, et ont déterminé des registres (appelés «Brustregister» et «Kopfregister», c'est-à-dire registre de poitrine et de tête) en faisant correspondre une ellipse par registre. Ils estiment ensuite la pente des phonétogrammes par mécanisme comme étant la pente du grand axe de l'ellipse. Leurs valeurs sont éloignées de nos mesures, car d'une part, la méthode d'estimation de la pente est très différente, d'autre part, les auteurs identifient les registres a posteriori, et ne peuvent donc pas prendre en compte la zone de recouvrement qui est précisément l'objet de notre étude. De plus la correspondance entre leur terminologie et celle que nous avons utilisée n'est pas assurée.

### 5.3.4 Variabilité des limites phonétographiques

Un point particulièrement sensible est la représentativité des mesures présentées ici. Plusieurs travaux (Sihvo et Sala, 1996; Gramming, 1991; Gramming *et al.*, 1991; Stone et Krause Ferch, 1982) ont porté sur la variabilité intra-chanteurs, qui est donc estimée à 3 dB environ au niveau des limites supérieure et inférieure.

Par comparaison, les variations inter-chanteur mesurées ici sont de l'ordre de 5 dB sur les limites supérieures. Ces valeurs sont proches de celles proposées dans la littérature (Sulter *et al.*, 1995; Akerlund *et al.*, 1992). Une variabilité plus importante a été constatée au niveau des limites inférieures. Cette variabilité peut être expliquée par celle du niveau des chanteurs recrutés, à savoir des chanteurs de niveau avancé ou professionnel. En effet, différentes études (Sulter *et al.*, 1995; Awan, 1991; LeBorgne et Weinrich, 2002) ont montré que l'entraînement vocal

avait pour effet d'abaisser la limite phonétographique inférieure. Ce point peut être expliqué par une recherche fine de contrôle de la pression sous-glottique, particulièrement délicat dans les phonations à faible SPL.

Nous avons également constaté que la variabilité augmente avec la fréquence d'émission en M1, ce que l'on peut attribuer en partie à des différences physiologiques mais également à la pratique différenciée des tessitures selon les chanteurs hommes. Nous pouvons en effet faire l'hypothèse que les différences de limites deviennent de plus en plus grandes entre des ténors et des basses quand la fréquence augmente, ce qui explique que la variabilité croisse. Chez les femmes, la variabilité peut être expliquée par une habileté plus ou moins développée à maîtriser le mécanisme M1 dans les productions piano et aigües. Ce type de productions ne leur est pas indispensable dans la mesure où elles peuvent les produire en mécanisme M2, avec une qualité vocale très similaire (registre de voix mixte, cf. section 1.2.3). Nous illustrons ces variabilités par les phonétogrammes présentés figure 5.5 : sur le phonétogramme de gauche, en mécanisme M1, nous voyons que la limite inférieure augmente de 20 dB environ en passant du ré3 au mi3. Cela signifie que S2 n'a plus réussi, en montant vers les notes aigües, à maintenir son mécanisme M1. MS2 (qui est chanteuse de gospel) ne présente pas cette variation brutale de niveau de limite inférieure. Les deux chanteuses présentent deux approches différentes de leur voix, impliquant cette variabilité très importante sur la limite inférieure du mécanisme M1.

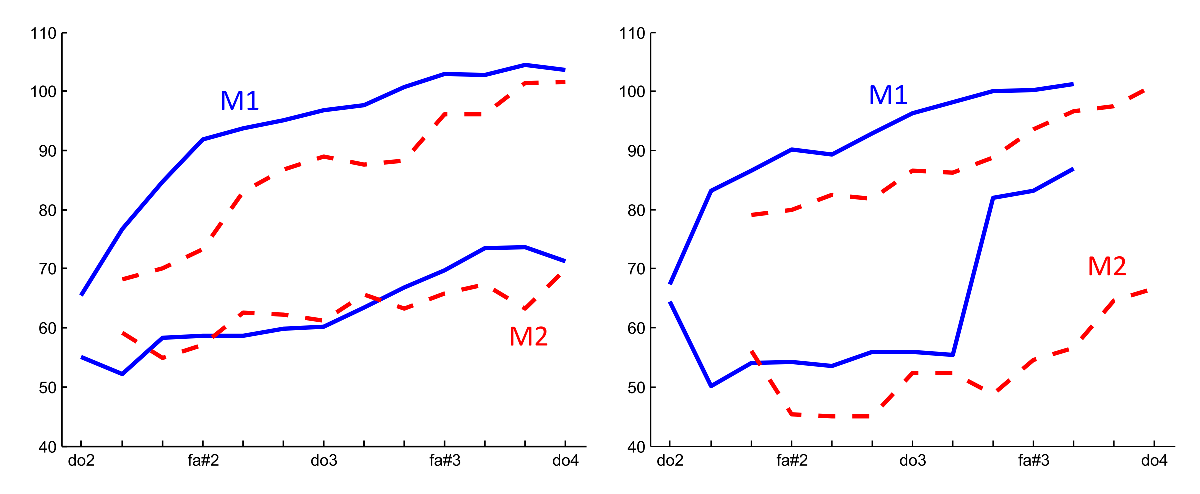



FIG. 5.5 – *Phonétogrammes par mécanisme laryngé de MS2 (gauche) et S2 (droite). Voyelle : /a/.*

L'entraînement vocal variable des sujets féminins enregistrés peut également expliquer la variabilité constatée sur la limite inférieure de M2. L'étude menée sur le non-accolement des cordes vocales (partie 5.4) apportera d'autres éléments pour comprendre ces variabilités. Néanmoins une étude de chanteurs très expérimentés et distinguant finement les différentes tessitures, montrerait très certainement des variabilités plus faibles.

## 5.4 Limites inférieures : prendre en compte le non-accolement des cordes vocales

Lors de productions pianissimo (notamment en fin de decrescendo dans notre base de données), il arrive que l'amplitude du signal EGG devienne extrêmement faible et que les pics d'ouverture et de fermeture glottique n'apparaissent plus sur le signal DEGG.

La figure 5.6 présente un decrescendo produit par une chanteuse en mécanisme M2. Nous constatons sur la courbe représentant ce signal EGG une diminution très importante de l'amplitude du signal EGG entre 1 et 2 s, ce signal demeurant ensuite extrêmement faible de 2.5 s à la fin de la production. Cette diminution soudaine de l'amplitude de l'EGG est accompagnée au niveau du signal sonore par une diminution de l'amplitude des harmoniques dont la fréquence excède 1500 Hz. Néanmoins, nous constatons que cette chanteuse, quasi professionnelle,

maitrise parfaitement l'intensité sonore puisque le niveau mesuré diminue de façon progressive, conformément à la consigne.

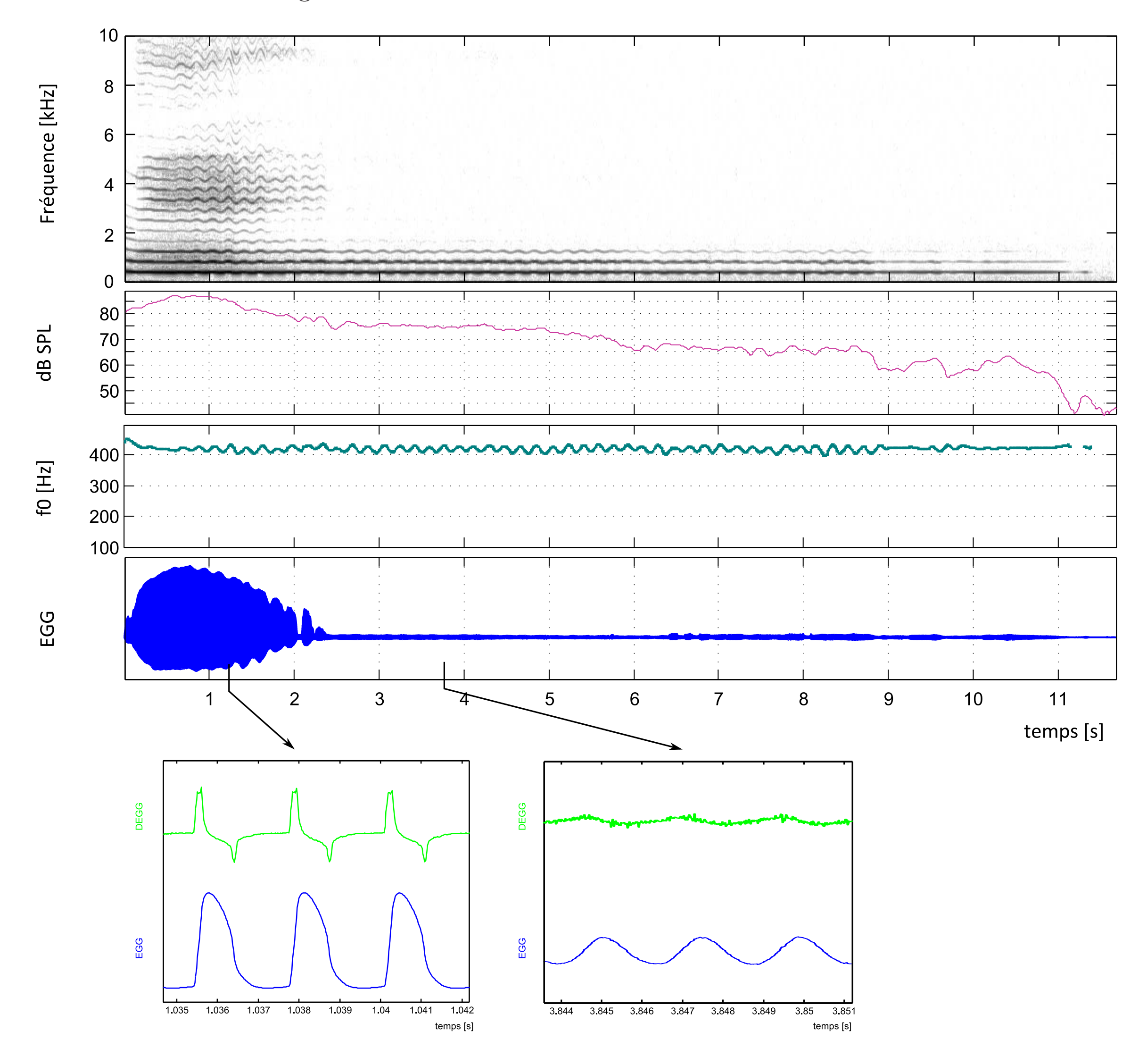



Fig. 5.6 – *Exemple de production (un decrescendo) présentant une diminution soudaine de l'amplitude du signal EGG. Chanteur : S3, sol#3, voyelle : /o/, mécanisme M2. Les signaux EGG et DEGG ont été tracés à deux instants différents, ils permettent de visualiser leur forme d'onde. Sur ces deux figures, leur amplitude n'est pas comparable (exemple sonore 4).*

Sur la figure 5.6, nous avons représenté le signal EGG et sa dérivée, à un instant où l'amplitude de l'EGG est importante et à un autre instant où elle est très faible. Dans le premier cas, le signal EGG présente l'allure habituelle d'une onde produite en mécanisme M2 (Roubeau *et al.*, 2009), et le signal DEGG présente les pics d'ouverture et de fermeture habituels (avec un dédoublement de pic de fermeture). Dans le cas de l'amplitude faible du signal EGG, l'onde présente un aspect très sinusoïdal, et sa dérivée ne présente plus les pics d'ouverture et de fermeture. Nous en déduisons qu'au cours de cette production, la chanteuse passe d'une situation où les cordes vocales s'accolent à une situation où le contact glottique disparait (ou n'est plus détecté).

La zone phonétographique correspondant à cette absence de détection d'accolement a peu été étudiée dans la littérature. Mentionnons tout de même Sulter *et al.* (1994) qui ont remarqué en comparant leur étude phonétographique à celle de Awan (1991) qu'il pouvait y avoir une différence constante et très importante (plus de 15 dB) sur la limite inférieure d'une étude à l'autre. Dans de nombreux cas une telle différence peut être attribuée à l'utilisation de la pondération A (le dB-A) pour tracer les phonétogrammes (voir section 3.1.2), mais dans ce cas-ci l'auteur suggère que cela serait dû à l'enregistrement ou non de sons correspondant à une

qualité particulièrement soufflée. Pabon et collaborateurs (Pabon, 1991; Bloothooft et Pabon, 1999) mentionnent également l'existence d'une zone dans le bas du phonétogramme (donc à très faible intensité) où le signal sonore est quasi-sinusoïdal. Vilkmann et collaborateurs (Vilkman *et al.*, 1995; Vilkman et Alku, 1993) ont étudié les transitions de registres entre modal et falsetto à faible intensité et dans le grave de la tessiture. Ils ont associé au terme de falsetto un type de production sans accolement des cordes vocales.

Nous avons cherché à détecter quelles étaient les zones phonétographiques correspondant à une absence de détection d'accolement. Nous avons donc calculé comme précédemment ce que seraient les limites moyennes des phonétogrammes de nos 21 chanteurs en ne considérant que les zones phonétographiques correspondant à un accolement détecté par l'électroglottographe. Pour cela, pour chaque chanteur, un seuil d'accolement a été estimé à partir des signaux EGG de la base de données correspondant aux parties des productions vocales utilisées effectivement pour tracer les phonétogrammes. Les productions dont l'amplitude de l'EGG est inférieure à ce seuil sont considérées comme ayant été produites sans accolement des cordes vocales. Le résultat est donné figure 5.7. (La méthode d'estimation de l'amplitude du signal EGG sera précisée section 6.1).

Sur cette figure, les zones situées entre les pointillés et la limite basse du phonétogramme correspondent à des sons que le chanteur émet sans accolement des cordes vocales (détecté par l'électroglottographe). La zone située entre la limite pointillée et la limite supérieure du phonétogramme correspond aux productions émises avec accolement détecté (et qui correspond donc au fonctionnement vocal rencontré dans le cas général en chant et parole). Nous constatons sur cette figure que cette zone sans accolement (détecté) des cordes vocales est très importante en mécanisme M2 et très petite en M1. Cela signifie que lors des decrescendi, les chanteurs ont peu utilisé ce type de phonation sans accolement venant du mécanisme M1, mais ils l'ont utilisé plus largement en venant du M2. Concrètement, une étude supplémentaire serait nécessaire pour expliciter dans quelle mesure il est possible d'émettre un son avec une vibration glottique de type M1 ou M2, sans accolement glottique, en observant directement la participation ou non du muscle vocal à la vibration laryngée. Soulignons que Vilkman *et al.* (1995) ont associé ce type de phonation sans accolement glottique au registre de falsetto.

Nous pouvons constater qu'en moyenne, les femmes ont une zone sans accolement plus étendue que les hommes. Le tableau 5.4 présente un détail de la différence d'intensité entre les limites inférieures des phonétogrammes et les limites de détection d'accolement glottique. En mécanisme M2, toutes voyelles confondues, la différence entre limites inférieures et limites de détection d'accolement est toujours supérieure à 8 dB pour les sopranos alors qu'elle ne dépassent pas les 5 dB chez les mezzo-sopranos. Cette différence peut être reliée à des différences de physiologie de larynx, ou/et à des différences en terme d'utilisation de leur voix. En effet, les sopranos chantant aigu, elles sont naturellement amenées à chanter fort. Pour trouver des nuances plus piano, elles sont amenées à travailler particulièrement le bas de leur phonétogramme, et donc peut-être à travailler cette zone sans accolement détecté. Vu l'étendue de cette zone chez certaines d'entre elles, il est fortement probable qu'elles soient amenées à utiliser ce type de production lors de représentations.

Parmi les mezzo-sopranos, nous constatons que deux d'entre elles n'ont pratiquement pas utilisé cette phonation sans accolement (détecté) en M2 alors que les deux autres l'ont utilisé. Nous touchons vraisemblablement ici à une autre limite par rapport à la pertinence de la limite inférieure : en dépit des indications, certains chanteurs ont considéré que cette zone ne correspondait pas à des productions acceptables, alors que d'autres auront adopté implicitement la position inverse.

D'ailleurs, si nous revenons maintenant à la figure 5.7, nous pouvons relever un deuxième fait intéressant : chez les femmes notamment, les écarts types calculés sont plus faibles sur les limites d'accolement que sur les limites inférieures de phonétogramme. La limite d'accolement est donc moins variable aux différences inter-sujets. Ceci peut être lié au résultat mis en évidence dans le paragraphe précédent : parmi les quatre mezzo-sopranos, deux seulement ont une limite phonétographique inférieure distincte de celle de détection d'accolement glottique. Cela peut

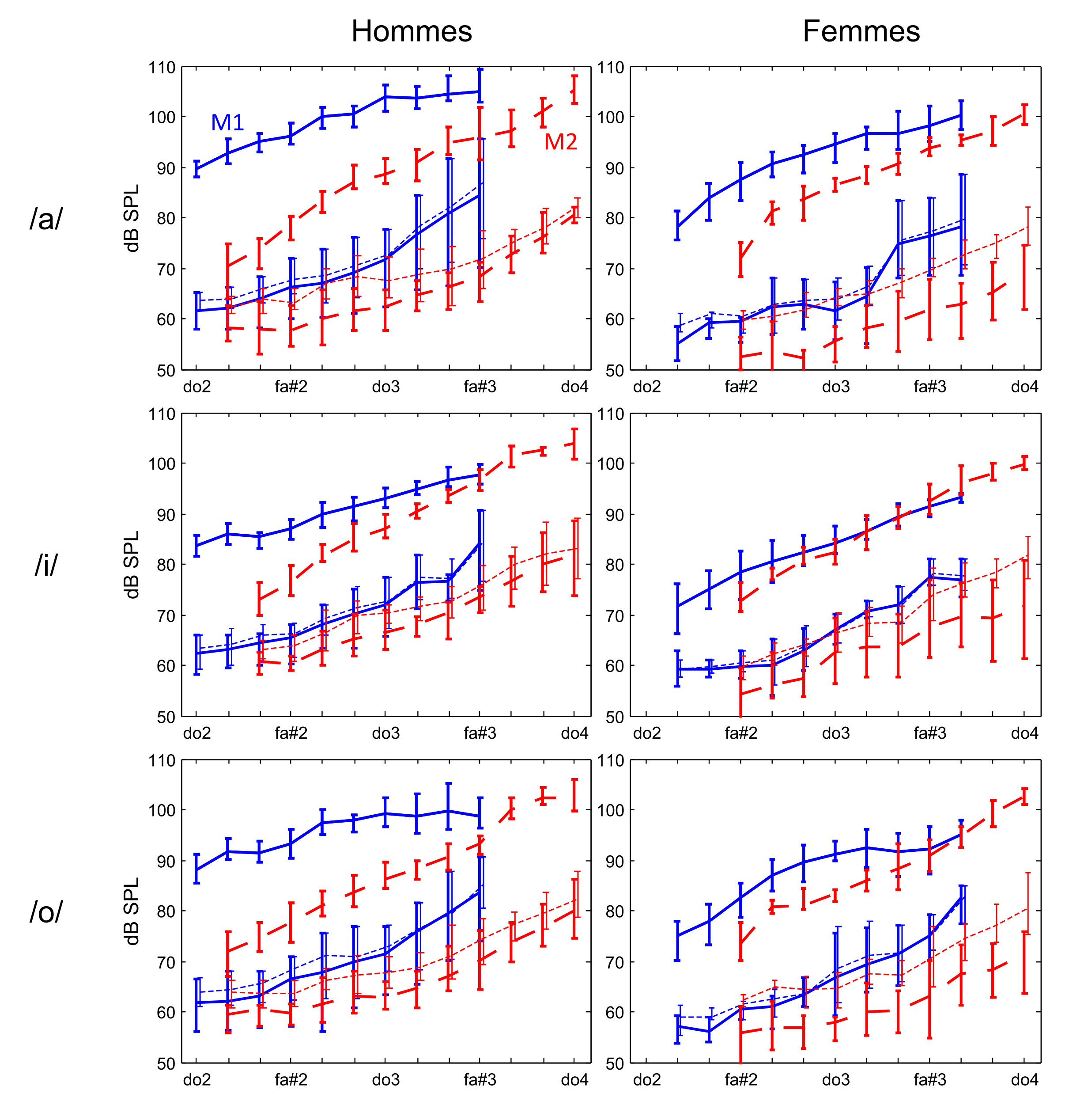



Fig. 5.7 – *Phonétogrammes moyens (et écarts types) par mécanismes laryngés, présentés séparément pour les hommes et les femmes (colonnes), et pour chaque voyelle (lignes). Les limites de détection d'accolement figurent en traits fin et pointillés.*

| | M1 | | | M2 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | /a/ | /i/ | /o/ | /a/ | /i/ | /o/ |
| S1 | 2 | 1 | 1 | 10 | 10 | 10 |
| S2 | 3 | 1 | 2 | 12 | 9 | 11 |
| S3 | 0 | 0 | 0 | 16 | 17 | 18 |
| S4 | 5 | 2 | 3 | 13 | 8 | 10 |
| MS1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| MS2 | 2 | 0 | 1 | 5 | 2 | 3 |
| MS3 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 1 |
| MS4 | 0 | 1 | 0 | 5 | 1 | 5 |
| CT1 | 0 | 0 | 2 | 4 | 4 | 3 |
| CT2 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 1 |
| T1 | 2 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 |
| T2 | 3 | 1 | 2 | 7 | 9 | 8 |
| T3 | 3 | 1 | 2 | 3 | 2 | 3 |
| T4 | 4 | 0 | 2 | 9 | 3 | 6 |
| Bar1 | 0 | 0 | 0 | 4 | 1 | 2 |
| Bar2 | 0 | 1 | 0 | 3 | 1 | 1 |
| Bar3 | 0 | 0 | 0 | 3 | 5 | 2 |
| Bar4 | 3 | 2 | 5 | 4 | 0 | 8 |
| B1 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 3 |
| B2 | 0 | 1 | 0 | 1 | 6 | 3 |
| B3 | 5 | 4 | 5 | 14 | 8 | 9 |

TAB. 5.4 – *Différence moyenne (en dB) entre les limites inférieures des phonétogrammes et les limites de détection d'accolement glottique, pour chaque chanteur, sur chaque mécanisme laryngé et chaque voyelle.*

contribuer à augmenter la variabilité des limites inférieures des phonétogrammes.

Il y aurait encore beaucoup à dire sur les particularités de chaque chanteur par rapport à cette zone d'accolement, nous y reviendrons dans la partie 6.1. Pour conclure, soulignons simplement que la prise en compte de cette limite d'accolement glottique permettra certainement à l'avenir de mettre en place des normalisations respectant mieux la diversité des chanteurs.

## 5.5 La zone de recouvrement: aire et voyelle

La zone de recouvrement est une région stratégique pour les chanteurs, ne serait-ce que parce que cette zone abrite au moins un «passage». Elle est, dans la plupart des cas, délimitée en fréquence par la limite grave du mécanisme M2 et la limite aigüe du mécanisme M1, et en intensité par la limite supérieure du mécanisme M2 et la limite inférieure du mécanisme M1. Nous allons dans cette partie étudier son aire ainsi que l'influence de la voyelle.

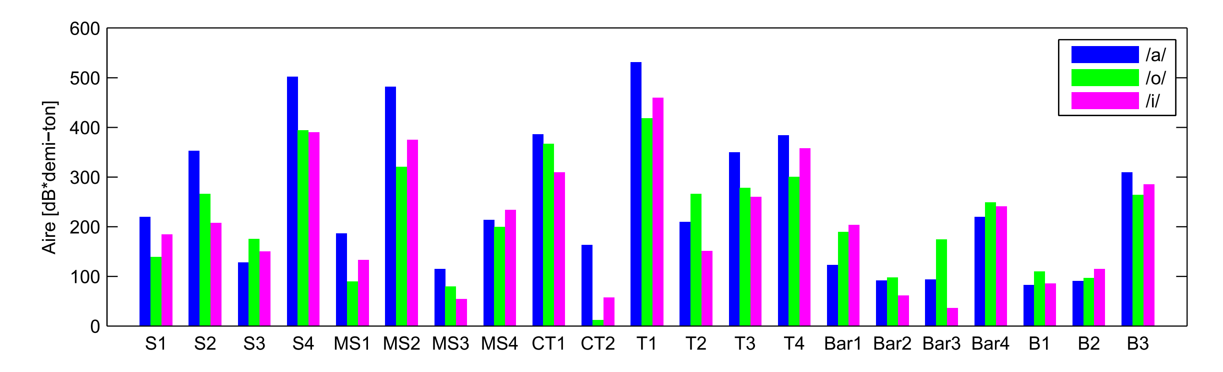



FIG. 5.8 – *Aire de recouvrement des phonétogrammes de mécanismes M1 et M2, en dB*demi-ton, pour chaque voyelle et chaque chanteur.*

Nous présentons sur la figure 5.8 les aires de recouvrement des phonétogrammes en mécanismes M1 et M2 de chaque chanteur, pour chaque voyelle. Nous pouvons constater sur ce graphique que l'aire de recouvrement dépend largement du chanteur. Parmi les femmes, S3, MS1 et MS3 ont des aires de recouvrement plutôt faibles, alors que S2, S4, MS2 ont des aires de recouvrement beaucoup plus grandes. Parmi les chanteurs masculins, les ténors ont en moyenne une aire de recouvrement plus importante que les barytons et que les basses.

Nous pouvons avancer que ces constatations sont liées à l'usage des mécanismes laryngés. Les ténors, qui repoussent la limite aigüe du M1, développent de fait la zone de recouvrement, ce qui n'est pas le cas (ou dans une moindre mesure) des barytons et des basses. Pour les voix de femmes, une zone de recouvrement très réduite est liée à une technique ciblant le changement de mécanisme autour de deux ou trois notes.

Sur l'ensemble des aires de recouvrement étudiées, la voyelle est responsable de 2.1 % de la variance totale, le reste étant imputable à la variabilité inter-individuelle, qui est donc la première cause de variabilité de la surface de la zone de recouvrement. La faible influence de la voyelle est à mettre en relation avec le fait que la zone de recouvrement est délimitée, dans la plupart des cas, par la limite inférieure du mécanisme M1 qui dépend fortement du chanteur, et la limite supérieure du mécanisme M2, qui dépend peu de la voyelle (comme nous l'avons vu dans la partie 5.1).

## 5.6 Identification et variabilité des voyelles

Suite à l'enregistrement des phonétogrammes par mécanisme et par voyelle, nous avons mentionné dans la partie 4.4.2 que l'identification du mécanisme laryngé a fait l'objet d'une validation minutieuse. Il semble alors pertinent d'adopter une même démarche de validation par rapport à la voyelle.

Nous pouvons croire a priori que l'identification d'une voyelle est chose aisée. En réalité la tâche peut s'avérer bien compliquée. D'abord, il faut identifier l'objet visé : qu'est-ce qu'une voyelle ? Peut-on la décrire exclusivement par les fréquences des deux (ou trois) premiers formants ? S'agit-il d'une notion à définir de façon perceptive, donc du point de vue acoustique et dans un contexte donné, en prenant en compte le timbre vocal (extra-vocalique), la hauteur, ... ?

Si l'on considère la voyelle de par les fréquences formantiques, valider la voyelle visée nécessite d'estimer les fréquences des deux premiers formants sur le signal sonore, ou d'utiliser des techniques de mesure des résonances du conduit vocal (voir partie 1.3.2) lors de l'enregistrement. Une fois ces données obtenues, il est nécessaire de les comparer à un modèle plus ou moins fin (donc plus ou moins complexe à définir) pour classifier chaque production comme étant un /a/, un /i/, un /o/ ou autre chose. Dans une étude sur la voix chantée lyrique, nous savons que les fréquences formantiques du modèle doivent être adaptées à la fréquence fondamentale du son (pour tenir compte du «formant tuning», cf. partie 1.4.2). La fréquence fondamentale du son, comme le sexe des chanteurs ou leur âge, est un paramètre à prendre en compte. Si la voyelle est envisagée à partir du champ de la perception sonore, elle est alors un objet que chacun est libre de définir selon ses propres représentations.

Effectuer un test d'écoute à propos des voyelles serait vraisemblablement très riche en informations. En effet il est possible que certaines voyelles aient «migré» au cours de l'enregistrement, comme par exemple des /a/ qui se soient fermés ou des /o/ qui se soient ouverts. De plus il serait également normal d'observer du «formant tuning» sur les trois voyelles (particulièrement sur le /i/ dont le premier formant est très bas). Nous n'avons pas organisé de test d'écoute par manque de temps : il y a en effet plus de 3500 productions (de mécanisme M1 ou M2) à tester.

En se focalisant sur les mesures de fréquences formantiques, nous présentons dans cette partie les résultats des estimations formantiques effectuées sur les productions de M0 (nous avons utilisé la méthode de prédiction linéaire par autocorrélation, cf. Makhoul, 1975). Les chanteurs avaient pour consigne de garder la forme du conduit vocal identique lors du crescendo ou decrescendo et de la production en M0 qui suivait. Si cette tâche a été respectée, les fréquences formantiques doivent donc correspondre à celles du crescendo/decrescendo, et ainsi nous fournir des renseignements précieux sur la conformation du conduit vocal sur les limites supérieures et inférieures des phonétogrammes. Le détail des résultats nous conduira à discuter l'efficacité de la méthode.

### 5.6.1 Fréquences formantiques moyennes mesurées en M0

La figure 5.9 présente les moyennes et intervalles interquartiles des fréquences des deux premiers formants, mesurées sur les productions de M0. Nous voyons par exemple sur les deux graphiques du haut que sur la voyelle /a/, le premier formant est localisé à 600-650 Hz environ pour les hommes et 700-750 Hz pour les femmes, et le deuxième formant à 1100 Hz pour les hommes, et 1250 Hz pour les femmes.

#### Discrimination des voyelles

La première constatation que nous pouvons faire à la vue de cette figure est que nous pouvons aisément distinguer les trois voyelles. Les fréquences formantiques prennent bien des valeurs différentes en fonction de la voyelle. Les chanteurs ont donc globalement respecté la consigne (au moins sur les productions de M0...). La figure 5.10 présente, dans le plan F1-F2, les positions des productions mesurées (pour les hommes et les femmes séparément). Nous constatons que les points correspondant à la voyelle /i/ sont très bien isolés, mais ceux correspondant au /o/ et ceux au /a/ sont proches. Sur cette dernière figure, nous avons également fait figurer, pour les hommes et les femmes, les valeurs médianes tabulées dans Calliope (1989). Par rapport à ces valeurs, nous constatons que les chanteurs ont produit des sons allant du [o] fermé au [ɔ] ouvert quand nous leur demandions un /o/, et se permettaient également de modifier leur /a/ jusqu'à atteindre le même [ɔ] ouvert. Nous voyons également que l'ensemble des /i/ produits est beaucoup plus vaste que la région décrite dans Calliope.

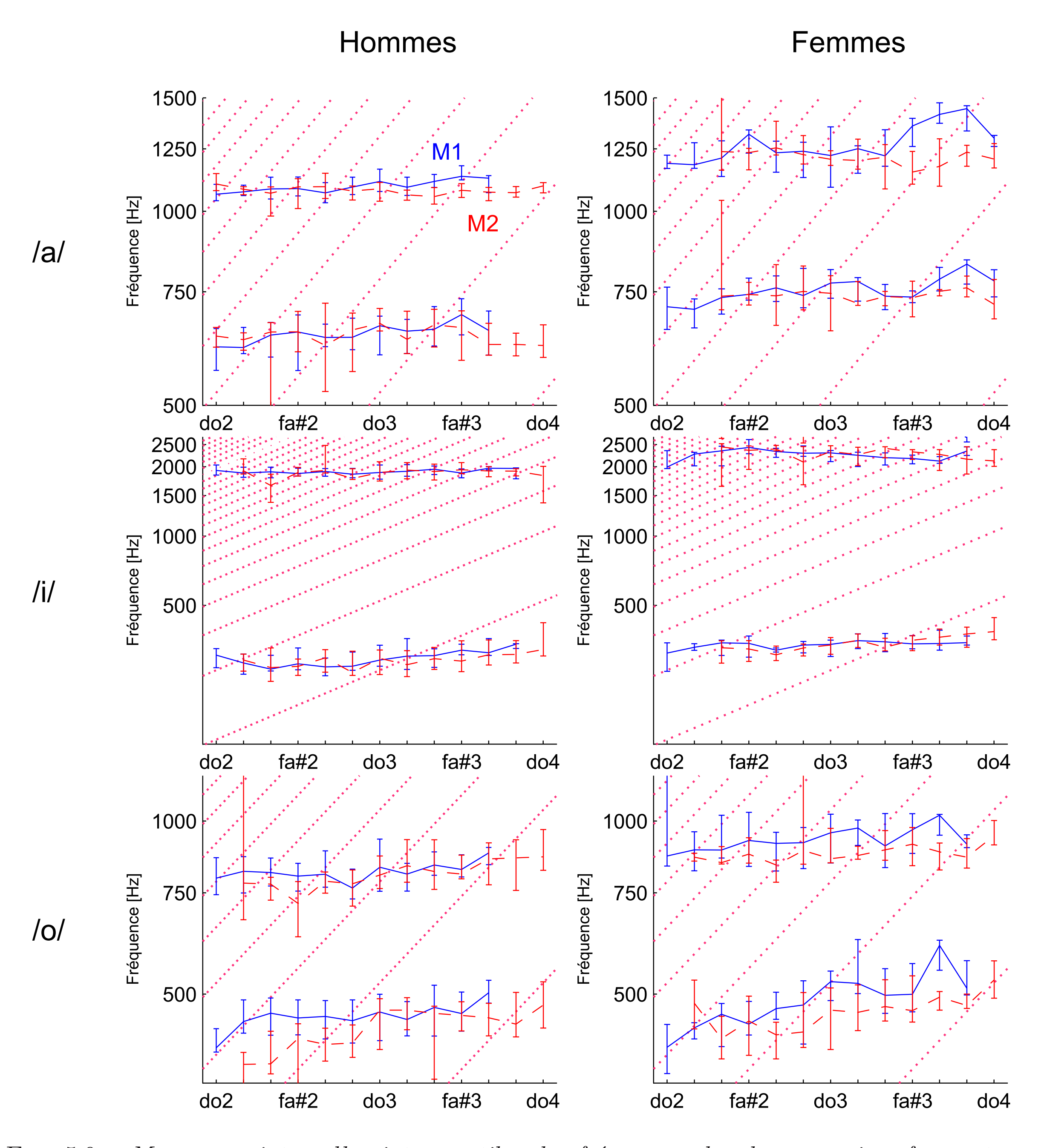
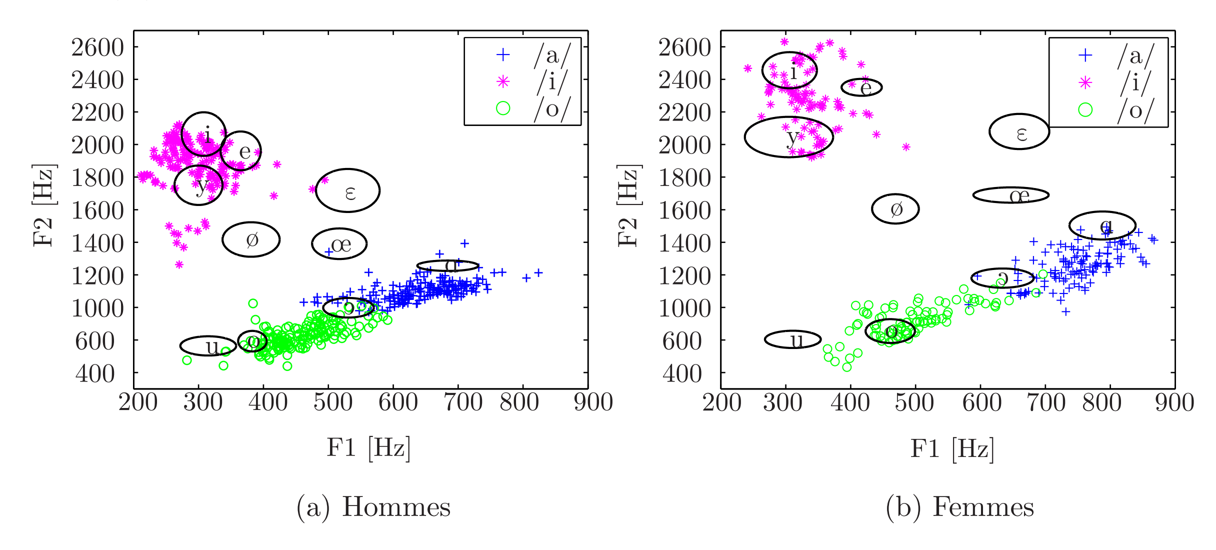



FIG. 5.9 – *Moyennes, intervalles interquartiles des fréquences des deux premiers formants en fonction de la hauteur, présentés séparément pour les trois voyelles, les hommes et les femmes. Les harmoniques sont également tracées, en traits fin. Les résultats concernant le mécanisme M1 sont tracés en bleu, ceux du M2 en rouge.*

Nous pouvons déduire de ces observations que lors de certains enregistrements, certains /o/ se sont «ouverts» (ce qui se manifeste sur le graphique par une augmentation du F1) et que certains /a/ se sont fermés.




(a) Hommes (b) Femmes

Fig. 5.10 – *Positions des productions des chanteurs hommes (a) et femmes(b) dans le plan F1-F2, pour les trois voyelles, et le mécanisme M1. Nous y avons superposé un triangle vocalique théorique, obtenu à partir des valeurs médianes et des écarts types donnés par Calliope (1989). Ces valeurs théoriques ont été obtenues à partir de la parole.*

**Fréquences formantiques et mécanismes laryngés**

Globalement, les fréquences formantiques estimées en M1 et en M2 sont très proches. Nous constatons néanmoins sur le /o/ ou sur le /a/ que les formants ont tendance à être plus élevés en mécanisme M1 qu'en M2, en particulier le deuxième formant de fa#3 à do4 sur le /a/ pour les femmes, et le premier formant de ré2 à sib2 sur le /o/ pour les hommes. Ces résultats sont en accord avec les observations de Henrich *et al.* (2008), effectuées avec l'appareillage de mesures de résonances du conduit vocal. Sur la voyelle /i/, aucune tendance ne se dégage, ni pour les hommes, ni pour les femmes.

**Formants et fréquence fondamentale**

Un résultat surprenant est que les fréquences formantiques mesurées sont très peu affectées par la fréquence fondamentale. Même sur la voyelle /i/, la fréquence du premier formant reste à peu près constante, et à partir du ré3 (pour les hommes) ou du fa#3 (pour les femmes), passe en dessous de la fréquence fondamentale, ce qui constitue une situation défavorable (Titze, 2008; Titze *et al.*, 2008). Ce constat cache en fait une plus grande variété dans les résultats observés sur la totalité de la base de données. La figure 5.11 présente les fréquences des quatre premiers formants pour Bar4 en mécanisme M2, sur /i/. Cette figure montre bien que le chanteur a adapté sa voyelle en fonction de la hauteur, puisque les formants 2 et 3 descendent à partir de fa#3, alors que le premier formant augmente pour rester au niveau de la fréquence fondamentale. Nous en déduisons que la plupart des chanteurs ne manifestent pas de «formant tuning» sur les estimations de fréquences formantiques effectuées sur les productions de M0, mais nous en avons néanmoins relevé dans quelques cas comme celui présenté ici.

### 5.6.2 Limites de la méthode d'estimation des fréquences formantiques

Les constatations mentionnées à propos du «formant tuning» nous permettent de discuter la pertinence de la méthode utilisée. Le «formant tuning» permet d'ajuster les fréquences formantiques légèrement au-dessus de la fréquence de l'harmonique la plus proche. Dans notre expérience, nous avons mesuré les fréquences formantiques sur des productions de M0 à fréquence très basse. Si nous avions obtenu des estimations de fréquences formantiques ajustées à

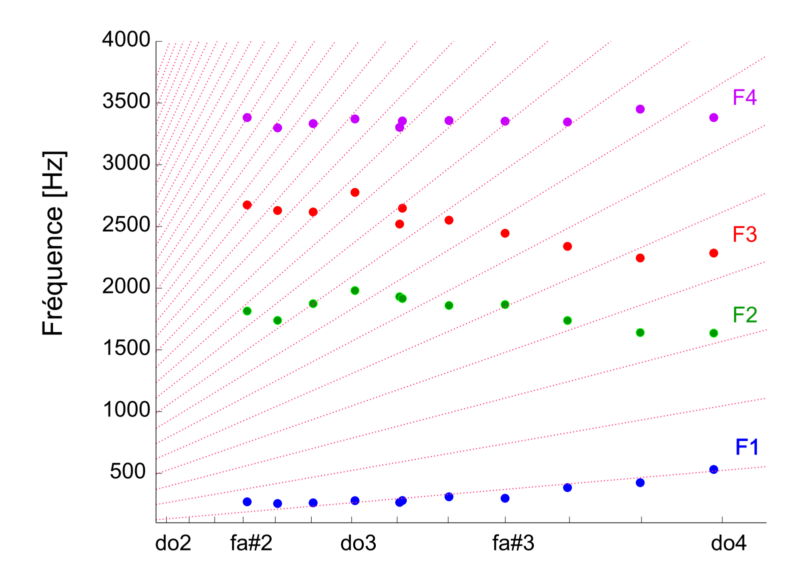



Fig. 5.11 – *Fréquences formantiques des quatre premiers formants, en fonction de la hauteur, pour Bar4, en mécanisme M2, sur /i/ et sur sa limite phonétographique inférieure. Les harmoniques sont tracées en couleur pâle.*

la fréquence du crescendo ou descrescendo qui précède lors de l'enregistrement, cela aurait pu constituer une preuve comme quoi le chanteur a bien gardé la position de la bouche convenable et aurait ainsi pu valider la représentativité des mesures. Or nous avons vu que ce n'était globalement pas le cas. Néanmoins les fréquences estimées sont cohérentes par rapport à la voyelle visée. La méthode utilisée fournit donc une estimation des fréquences formantiques qui est vague et qui ne nous permet pas de mettre en évidence des adaptations fines que le chanteur a pu effectuer.

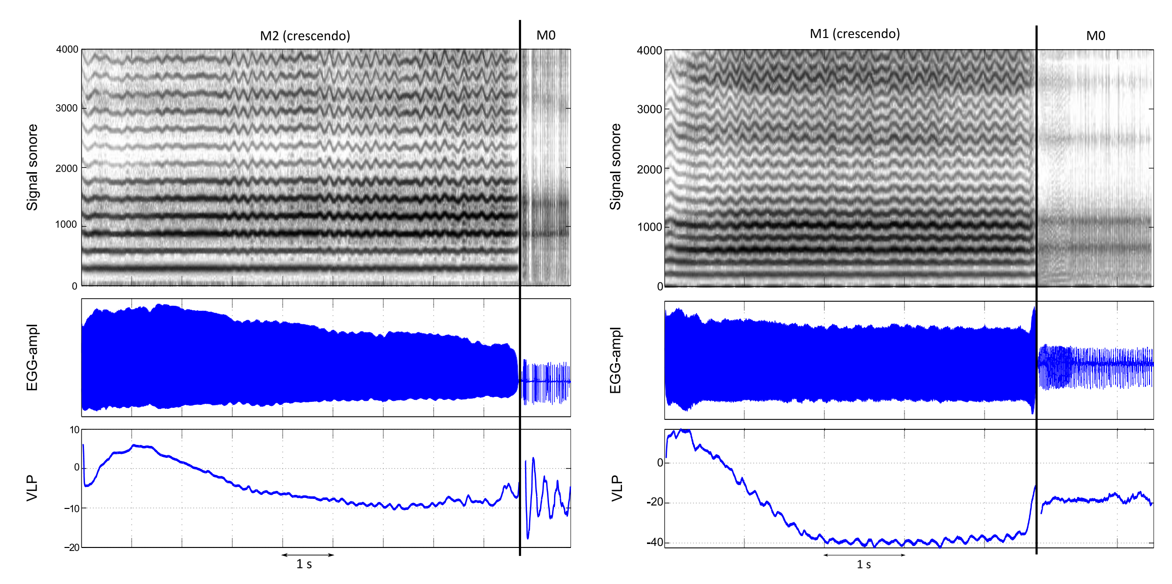
De plus, compte tenu des grandes variations en terme d'activité musculaire laryngée entre le mécanisme M0 et l'aigu du mécanisme M1 ou le mécanisme M2, il est probable que la hauteur du larynx ait pu varier chez certains chanteurs entre le crescendo ou decrescendo et le M0, ce qui modifie les fréquences formantiques. Pour illustrer notre propos, nous avons représenté figure 5.12 les spectrogrammes, amplitudes EGG et VLPs de deux crescendi auxquels nous avons associé les productions en M0 à partir desquelles nous avons effectué nos estimations formantiques. Nous observons, dans le premier cas, que le larynx a été maintenu dans la même position sur la fin du crescendo et sur la production de M0 (bien qu'il soit assez instable en M0), ce qui n'est pas le cas sur la production présentée en figure 5.12(b). Néanmoins le spectrogramme n'est pas un outil nous permettant de quantifier l'influence de la position du larynx sur les fréquences formantiques.

Nous conclurons donc cette partie en soulignant que ces mesures de fréquences formantiques ne nous permettent pas de valider l'ensemble de la base de données en termes de voyelles.

## 5.7 Bilan du chapitre

Nous avons présenté des phonétogrammes par mécanisme laryngé et par voyelle.

1. Influence de la voyelle sur les limites supérieures :
   Dans la tessiture étudiée, la limite supérieure des phonétogramme de M1 est d'environ 10 dB supérieur sur /a/ que sur /i/, la limite supérieure sur /o/ prenant des valeurs intermédiaires entre les limites observées sur /i/ et /a/. En mécanisme M2, la voyelle n'a pas d'influence statistiquement significative sur la limite supérieure. Ce résultat est indépendant du sexe du chanteur, de sa catégorie vocale, de son entrainement vocal (allant d'amateur à professionnel). Il permet en outre d'expliquer la variabilité des résultats présenté dans la littérature, ne prenant pas en compte les mécanismes laryngés. La théorie




(a) Exemple produit par S3, sur un ré3, sur la voyelle /a/ et en M2.

(b) Exemple produit par Bar3, sur un sol#2, sur la voyelle /a/ et en M1.

FIG. 5.12 – *Spectrogramme, amplitude du signal EGG et position verticale du larynx pour deux productions vocales. Chacune d'elle est constituée d'un crescendo suivi du court son en M0 à partir duquel les fréquences formantiques ont été estimées. Sur la figure 5.12(a), nous n'observons pas de différence de VLP entre le crescendo et la production en M0 (en moyenne), alors que nous en obervons une sur la figure 5.12(b).*

source-filtre permet d'expliquer les résultats obtenus en mécanisme M1. Il est nécessaire de prendre en compte la spécificité du mécanisme M2 pour comprendre les résultats observés dans ce mécanisme.

2. Influence de la voyelle sur les limites inférieures :
   Nous n'avons pas relevé d'influence de la voyelle sur les limites inférieures, en M1 comme en M2. La variabilité inter-sujet est très grande, nous pouvons supposer qu'elle est supérieure à la variabilité qu'induirait la voyelle. Elle peut être expliquée par la difficulté de contrôle de la pression sous-glottique et l'entrainement des chanteurs à contrôler leurs productions dans les différents mécanismes laryngés dans la zone de recouvrement des mécanismes.

3. Limites inférieures : le non-accolement.
   Certaines zones, de faible intensité et en mécanisme M2, peuvent être produites sans accolement détecté des cordes vocales. Ces productions sont très utilisées par les sopranos, de manière variable par les hommes, mais pas par les mezzo-sopranos. L'utilisation ou non de ce type de production lors de l'enregistrement explique une partie de la variabilité inter-chanteur observée sur les limites inférieures.

4. Ces observations ont plusieurs conséquences qui nous semblent pertinentes pour les chanteurs :
   – la différence de limite supérieure entre les phonétogrammes de M1 et de M2 varie avec la voyelle. Sur /a/, la limite supérieure obtenue en mécanisme M1 est plus forte que celle en M2. Sur /o/ et à plus forte raison sur /i/, la tendance s'inverse à partir d'une fréquence dépendant de la voyelle. Dans ces cas-ci, nous n'observons plus le décrochage de la limite supérieure sur les phonétogrammes globaux, tant décrit dans la littérature.

– la dynamique vocale des chanteurs est plus grande sur /a/ que sur /o/ et sur /i/, et cette tendance est plus importante que la variabilité inter-sujet en dessous du do3 pour les hommes et les femmes en M1. Elle ne l'est pas en M2.
– l'aire des phonétogrammes est toujours plus grande dans le mécanisme laryngé principalement utilisé en représentation.
– l'aire de la zone de recouvrement des mécanismes laryngés varie peu avec la voyelle. Elle dépend surtout de la tessiture vocale des chanteurs.

5. Validation des voyelles.
   Nous avons mesuré les fréquences des deux premiers formants sur les productions de M0 que nous avons demandées. Cette méthode s'est révélée inadaptée pour décrire les ajustements vocaliques fins, en particuliers elle ne permet pas de rendre compte du «formant tuning» que nous attendions.

Nous allons maintenant décrire l'influence de la voyelle sur plusieurs paramètres glottiques, avant de chercher des hypothèses permettant d'expliquer la différence d'influence de la voyelle sur les phonétogrammes de M1 et de M2.

# Chapitre 6

# Phonétogrammes, voyelles et paramètres glottiques

L'obectif de ce chapitre est d'étudier l'influence de la voyelle sur des paramètres glottiques, en M1 et en M2, pour voir dans quelle mesure cette influence diffère d'un mécanisme à l'autre. Nous verrons ensuite si cette étude nous apporte des éléments supplémentaires pour comprendre les résultats obtenus sur les limites des phonétogrammes.

Nous avons choisi de travailler sur trois paramètres glottiques : l'amplitude du signal EGG, la position verticale du larynx et le quotient ouvert. Nous considérons l'amplitude du signal EGG comme un paramètre de source dans la mesure où elle nous permet d'évaluer la surface de contact maximale des cordes vocales (au cours de chaque cycle glottique). Il s'agit donc (cf. section 1.2) d'un bon indicateur pour discriminer les mécanismes laryngés. Nous allons chercher à comprendre, à travers l'étude de ce paramètre, dans quelle mesure l'utilisation du /a/, du /i/ ou du /o/ implique une adaptation de la vibration glottique, et comment cela se traduit en termes de surface de contact des cordes vocales, et ce en mécanisme M1 et en M2. De manière analogue, nous allons chercher à comprendre dans quelle mesure la position du larynx et le quotient ouvert varient de la même manière avec la voyelle, en M1 et en M2.

**Méthodologie d'étude**

Les trois paramètres que nous étudions peuvent, a priori, être corrélés à d'autres paramètres que le mécanisme laryngé et la voyelle. Parmi ces paramètres, nous considèrerons particulièrement la hauteur et l'intensité, soient les deux dimensions du phonétogramme. Quand nous comparons des valeurs prises d'un paramètre donné, les autres étant constants, nous nous devons d'expliciter quels sont ces autres paramètres. Nous avons fait le choix, pour cette étude, d'effectuer systématiquement des comparaisons à hauteur et intensité fixées. Dans ces conditions, une méthode simple pour représenter les variations d'un paramètre en fonction de la hauteur et de l'intensité simultanément consiste à faire figurer dans un phonétogramme les valeurs prises par ce paramètre dans une troisième dimension (ou par une échelle de couleur). Nous obtenons alors un phonétogramme de paramètre.

Ce choix de méthodologie a une conséquence importante : nous comparerons les mécanismes M1 et M2 dans leur zone de recouvrement, et nous ne comparons les différentes voyelles, en M1 et en M2, que dans leurs zones communes. Comme nous l'avons vu, les limites phonétographiques sont les mêmes en fonction de la voyelle en M2, donc ce choix a peu d'incidence en ce qui concerne le mécanisme M2. En M1, comme les limites supérieures des phonétogrammes diffèrent en fonction de la voyelle, nous prendrons en compte la totalité de la dynamique du chanteur sur la voyelle /i/, mais seulement une partie de la dynamique sur le /a/. Néanmoins, en termes de niveau SPL, les aires prises en compte sont les mêmes.

Nous proposons maintenant de présenter les travaux développés sur ces trois paramètres et de voir ce qu'ils apportent par rapport à notre problématique.

## 6.1 Phonétogrammes et amplitude du signal EGG

L'amplitude du signal EGG est un indicateur intéressant puisqu'il nous renseigne sur la surface d'accolement des cordes vocales (Childers *et al.*, 1984, 1990). Elle est notamment utilisée pour détecter des transitions de mécanisme laryngé (Roubeau, 1993; Roubeau *et al.*, 1987; Miller *et al.*, 2002). La connaissance de cette amplitude peut donc nous fournir de précieux renseignements quant au fonctionnement glottique.

L'examen de l'amplitude du signal électroglottographique est cependant un exercice délicat. En effet ce signal souffre des défauts suivants :

– ce signal n'est pas calibré, c'est-à-dire que son unité est le volt, et qu'il ne peut pas être converti en $mm^2$ (à moins de pouvoir mesurer la surface d'accolement par un autre moyen, ce qui n'est pas possible aujourd'hui).
– le signal d'amplitude varie d'un chanteur à l'autre, du fait des différences morphologiques de leurs cous. Dans la mesure où le signal n'est pas calibré, nous ne pouvons a priori pas comparer l'amplitude du signal entre deux chanteurs.
– ce signal est aussi sensible à la position relative du larynx par rapport aux électrodes. L'amplitude varie donc avec la position verticale du larynx. L'utilisation de doubles électrodes atténue ce défaut mais ne l'annihile vraisemblablement pas. L'amplitude du signal EGG varie aussi sur l'ensemble de la séance si les électrodes ne sont pas suffisamment bien plaquées sur le cou du chanteur.

Pour contourner les deux premières difficultés, nous avons normalisé l'amplitude de l'EGG : pour chaque chanteur, l'amplitude du signal EGG est divisée par l'amplitude maximale observée chez ce chanteur. L'amplitude de l'EGG peut alors varier de 0 à 100. Néanmoins nous garderons à l'esprit dans nos comparaisons entre chanteurs que le maximum d'amplitude mesurée ne correspond pas nécessairement à la «même» situation laryngée (en terme de position du larynx par rapport aux électrodes et de maximum de surface de contact possible). Une deuxième conséquence est qu'il reste sujet à caution quant à sa comparaison entre le début et la fin de l'enregistrement. Néanmoins, compte tenu de l'ordre dans lequel le protocole a été enregistré, les productions sur les trois voyelles à hauteur et mécanisme donné, n'étaient jamais très éloignées dans le temps. Nous pourrons donc nous permettre cette étude.

### 6.1.1 Méthode d'estimation de l'amplitude du signal EGG

Nous avons utilisé une méthode d'estimation de l'amplitude du signal EGG proposée et programmée par Boris Doval, inspirée de la méthode d'estimation de l'enveloppe spectrale appelée «true envelope» (Röbel et Rodet, 2005). Il s'agit d'une méthode itérative permettant, dans son utilisation première, d'affiner le calcul des coefficients cepstraux. Dans l'utilisation que nous en avons faite, chaque itération consiste en un filtrage passe-bas et une addition.

Partant de la partie positive du signal EGG ($A_0 = \max(0,egg)$), l'amplitude du signal $A_i$ estimée lors de la i$^{\text{ième}}$ itération est calculée par :

$$A_i = \max(egg,A_{i-1})$$

L'amplitude $A_i$ obtenue est ensuite filtrée passe-bas, la fréquence de coupure étant à affiner en fonction du signal de départ. Dans notre cas, nous avons choisi comme fréquence de coupure $\min(f_0)/3$. L'algorithme s'arrête au bout de 20 itérations, ou quand l'enveloppe estimée vaut au pire 99 % de l'amplitude du signal EGG.

Cette méthode permet donc d'estimer l'enveloppe supérieure du signal EGG, il suffit d'appliquer le même algorithme sur l'opposé du signal EGG pour obtenir l'enveloppe inférieure. L'amplitude que nous avons étudiée correspond à la différence entre l'enveloppe supérieure et l'enveloppe inférieure.

Notons que l'algorithme décrit ci-dessous calcule une enveloppe sur l'ensemble des signaux d'entrée, qu'ils soient voisés ou non. Nous avons vu dans la section 5.4 que pour certaines productions, associées la plupart du temps au mécanisme M2, aucun accolement glottique n'était

détecté, ce qui se traduit au niveau du signal EGG par une très faible amplitude. Pour l'ensemble des statistiques présentées ci-après à propos de l'amplitude de l'EGG, nous n'avons pris en compte que les données pour lesquelles un accolement est détecté.

### 6.1.2 Variation de l'amplitude de l'EGG avec la hauteur et l'intensité

L'ensemble des phonétogrammes d'amplitude de l'EGG est présenté en annexe E.

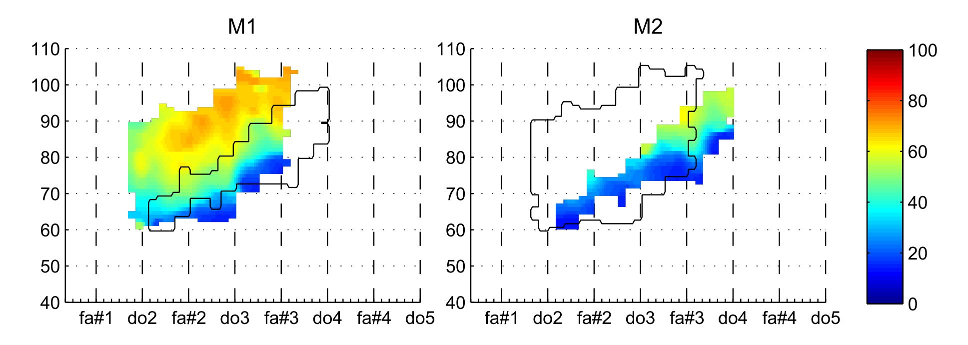



FIG. 6.1 – *Phonétogramme d'amplitude de l'EGG (exprimée en %). Chanteur : B3, voyelle /a/.*

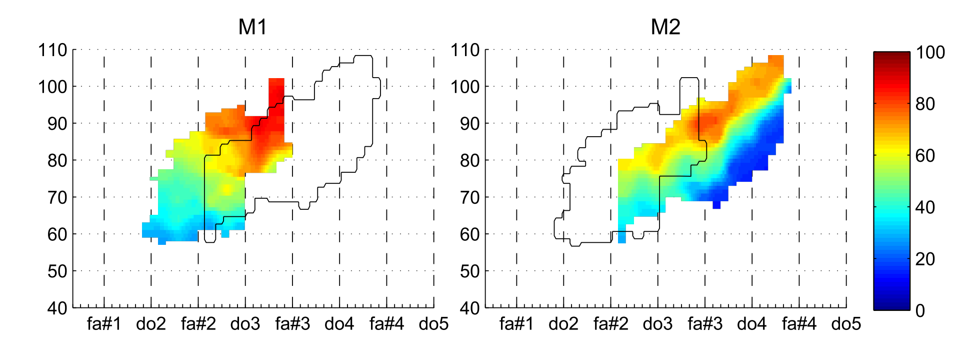



FIG. 6.2 – *Phonétogramme d'amplitude de l'EGG (exprimée en %). Chanteur : MS4, voyelle /a/.*

Les figures 6.1 et 6.2 présentent deux exemples de phonétogrammes d'amplitude de l'EGG. Nous observons chez les deux chanteurs une augmentation de l'amplitude de l'EGG avec le SPL. Nous pouvons également, chez MS4 et en mécanisme M1, relever une augmentation d'amplitude de l'EGG avec la hauteur, si bien que la zone maximale correspond aux hautes fréquences et hautes intensités.

Le tableau 6.1 présente les coefficients de corrélation partielle entre l'amplitude de l'EGG et la hauteur d'une part, et l'intensité d'autre part. Avant de présenter les résultats, rappelons que le coefficient en corrélation varie entre -1 et 1, qu'il évalue le caractère linéaire d'une liaison. Le signe du coefficient nous renseigne quant au sens de variation du paramètre étudié (l'amplitude de l'EGG ici) avec la hauteur ou l'intensité. S'il est négatif, cela signifie que l'amplitude de l'EGG diminue quand l'intensité (resp. la hauteur) augmente. Un coefficient de corrélation proche de 0 signifie que les deux variables étudiées ne sont pas fortement corrélées linéairement (c'est-à-dire soit que la liaison n'est pas linéaire, soit que les paramètres sont indépendants). Précisons que du fait de son mode de calcul, le coefficient de corrélation ne varie pas si l'on change linéairement l'échelle d'un des paramètres testés. Cela signifie qu'étudier l'amplitude de l'EGG en fonction de la hauteur en demi-tons ou en Hertz changera les coefficients de corrélation (puisque la liaison entre les demi-tons et les Hertz n'est pas linéaire), mais la renormalisation du signal EGG (ou du VLP) ne le modifie pas. Nous avons choisi d'exprimer la hauteur en demi-tons car cette unité est plus proche de la perception humaine de la hauteur que le Herz. Enfin, le coefficient de corrélation partielle permet de prendre en compte la dépendance entre la fréquence et l'intensité que nous avons relevée sur les phonétogrammes.

Nous présentons dans le tableau 6.1 uniquement les résultats sur la voyelle /a/.

| | M1 | | M2 | |
|---|---|---|---|---|
| chanteur | $f_0$ | $Idb$ | $f_0$ | $Idb$ |
| S1 | 0.14 | 0.55 | -0.48 | **0.87** |
| S2 | **-0.85** | **0.91** | -0.51 | **0.84** |
| S3 | **-0.70** | 0.66 | -0.64 | **0.72** |
| S4 | **-0.75** | **0.82** | -0.57 | **0.83** |
| MS1 | **-0.79** | **0.84** | -0.61 | **0.91** |
| MS2 | **-0.79** | **0.82** | **-0.71** | **0.87** |
| MS3 | 0.57 | **0.87** | -0.25 | **0.74** |
| MS4 | 0.48 | **0.81** | -0.58 | **0.76** |
| CT1 | -0.02 | 0.35 | -0.54 | **0.80** |
| CT2 | -0.22 | 0.4 | -0.28 | 0.63 |
| T1 | **-0.79** | 0.47 | -0.68 | **0.82** |
| T2 | 0.37 | 0.57 | -0.46 | **0.75** |
| T3 | **0.75** | 0.28 | 0.30 | 0.40 |
| T4 | 0.47 | **0.73** | 0.17 | **0.85** |
| Bar1 | -0.076 | 0.54 | 0.32 | **0.75** |
| Bar2 | -0.60 | 0.70 | -0.54 | **0.80** |
| Bar3 | 0.26 | 0.36 | 0.19 | 0.52 |
| Bar4 | -0.01 | 0.69 | -0.17 | **0.78** |
| B1 | 0.25 | 0.30 | -0.38 | 0.67 |
| B2 | 0.28 | -0.01 | **-0.85** | **0.80** |
| B3 | -0.26 | **0.73** | -0.54 | **0.79** |

TAB. 6.1 – *Coefficients de corrélation partielle entre l'amplitude du signal EGG et la hauteur (en demi-tons) ou l'intensité, pour chaque chanteur, chaque mécanisme laryngé, et la voyelle /a/. Les corrélations fortes (supérieures à 0.7 en valeur absolue) figurent en gras.*

En mécanisme M1, nous avons relevé cinq corrélations fortes et négatives avec la hauteur chez les femmes. Pour quatre d'entre elles, nous relevons également une corrélation positive forte avec l'intensité. Il semblerait donc que pour ces chanteuses, l'amplitude du signal EGG soit maximale dans le grave fortissimo du mécanisme M1. Il est intéressant de constater que nous n'observons pas cette tendance de façon aussi marquée chez les hommes. La surface d'accolement des cordes vocales varie donc différemment avec la hauteur et l'intensité en fonction des sujets, soit en raison de différences physiologiques, soit à cause d'une utilisation différente du larynx (les femmes chantent habituellement en mécanisme M2) impliquant une différence dans l'entrainement vocal. Ces observations sont en accord avec celles de Hacki (1996).

En mécanisme M2, la tendance est beaucoup plus tranchée et commune aux deux sexes : nous observons que toutes les femmes et neuf hommes sur treize présentent une corrélation forte avec l'intensité, alors que seuls un homme et une femme en présentent avec la hauteur. De façon générale donc, l'amplitude du signal EGG semble très fortement liée à l'intensité en mécanisme M2. Comme la corrélation présentée ici est partielle, la liaison explicitée est avec une intensité décorrélée de la fréquence, ce qui correspond à une position verticale dans le phonétogramme, relativement aux limites inférieure et supérieure. L'amplitude de l'EGG a donc tendance à augmenter avec l'intensité en mécanisme M2.

| | | M1 | | | M2 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | /a/ | /i/ | /o/ | /a/ | /i/ | /o/ |
| Hommes | + | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Femmes | + | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Hommes | - | 1 | 1 | 2 | 1 | 4 | 4 |
| Femmes | - | 5 | 3 | 1 | 1 | 5 | 1 |

Tab. 6.2 – *Nombre de coefficients de corrélation partielle forte, positifs et négatifs, entre l'amplitude du signal EGG et la hauteur (en demi-tons), pour les hommes et les femmes séparément et pour chaque voyelle.*

| | | M1 | | | M2 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | /a/ | /i/ | /o/ | /a/ | /i/ | /o/ |
| Hommes | + | 2 | 2 | 2 | 9 | 9 | 9 |
| Femmes | + | 6 | 4 | 5 | 7 | 8 | 8 |
| Hommes | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Femmes | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tab. 6.3 – *Nombre de coefficients de corrélation partielle forte, positifs et négatifs, entre l'amplitude du signal EGG et l'intensité, pour les hommes et les femmes séparément et pour chaque voyelle.*

Les tableaux 6.2 et 6.3 présentent le nombre de corrélations partielles fortes constatées entre l'amplitude de l'EGG et la hauteur d'une part, et entre l'amplitude de l'EGG et l'intensité d'autre part, pour les hommes et pour les femmes séparément. La tendance la plus marquée est la corrélation forte (et positive) que nous observons chez les hommes et les femmes, sur les trois voyelles, en mécanisme M2. Nous retrouvons ce type de corrélation en mécanisme M1, mais surtout chez les femmes. Du tableau 6.2 nous pouvons constater que la corrélation entre l'amplitude de l'EGG et la fréquence est beaucoup moins répandue, elle est négative dans presque tous les cas (c'est à dire que l'amplitude diminue quand la fréquence augmente). De plus, elle est plus marquée sur la voyelle /a/ en M1 et sur la voyelle /i/ en M2, en particulier chez les femmes.

### 6.1.3 Influence du mécanisme laryngé sur l'amplitude de l'EGG

Nous avons déjà approché l'influence du mécanisme laryngé sur l'amplitude du signal EGG lors du paragraphe précédent. Nous avons vu que la liaison entre l'amplitude EGG et l'intensité

n'était pas la même. Nous présentons figure 6.3 des ordres de grandeur de l'amplitude EGG dans la zone de recouvrement des mécanismes laryngés.

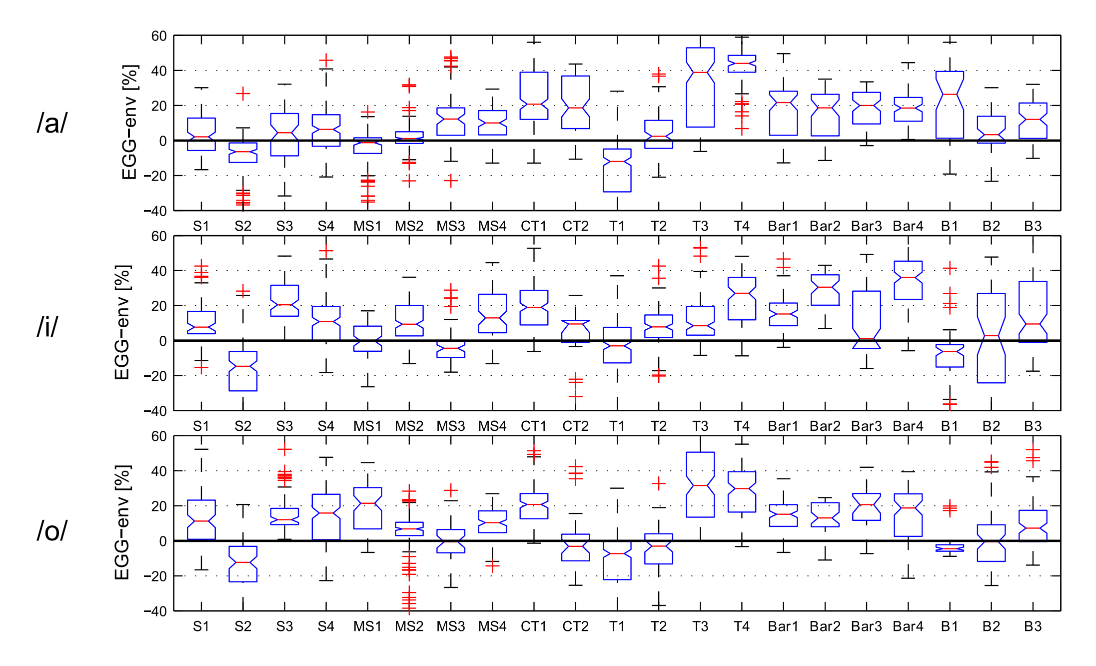



FIG. 6.3 – *Statistiques de la différence d'amplitude du signal EGG entre les productions de M1 et celles de M2, à même hauteur et même intensité. Les résultats sont détaillés pour chaque chanteur et chaque voyelle.*

Cette figure nous permet de constater que la plupart des valeurs observées sont positives, ce qui signifie que l'amplitude du signal EGG est plus grande en mécanisme M1 qu'en M2. Ce résultat confirme tout à fait les études menées sur les transitions de mécanisme laryngé, qui décrivent une diminution de l'amplitude de l'EGG lors de transitions M1-M2 (Roubeau *et al.*, 1987, 1989; Roubeau, 1993; Roubeau *et al.*, 2009). Nous constatons également que cette influence du mécanisme laryngé se retrouve sur les trois voyelles étudiées.

### 6.1.4 Influence de la voyelle sur l'amplitude de l'EGG

Nous nous restreindrons aux voyelles /a/ et /i/.

La figure 6.4 présente l'ensemble des valeurs médianes, les intervalles interquartiles et les valeurs adjacentes supérieures et inférieures des différences d'enveloppes mesurées à hauteur et intensité fixées, entre les voyelles /a/ et /i/. L'examen de cette figure ne laisse pas apparaitre de tendance marquée. Notons néanmoins que 15 des 21 chanteurs ont une valeur médiane positive en mécanisme M1 et 11 en mécanisme M2. Certains chanteurs présentent une tendance assez nette comme Bar4 ou S4 en M1. Pour ces chanteurs, l'amplitude de l'EGG est plus grande sur /i/ que sur /a/.

Il est compliqué d'analyser les résultats de façon plus détaillée, tant les sources de variations de l'amplitude de l'EGG sont nombreuses. Nous allons maintenant examiner un cas particulier ; celui de CT1 qui, à la fin de sa séance d'enregistrement, a produit plusieurs exemples de changements de voyelles sur une note tenue. Seules les voyelles /a/ et /i/ ont été explorées, et toutes ces productions ont été émises en mécanisme M2. La figure 6.5 présente une de ces productions. Sur le spectrogramme nous voyons vers 2.1 s une modification radicale de la fréquence des deux premiers formants, traduisant le changement de voyelle du /a/ au /i/ : F1 diminue et F2 augmente. L'intensité est stable à 85 dB sur /a/, elle baisse très légèrement sur /i/ et un vibrato d'amplitude se déclenche, en phase avec le vibrato de fréquence. Cela traduit le fait que sur cette voyelle et à cette hauteur, CT1 a placé son F1 juste au-dessus de la fréquence fondamentale. Quand f0 augmente, H1 se rapproche de F1, donc l'intensité augmente, et quand f0 diminue, H1 s'éloigne de F1, et donc l'intensité diminue également. La courbe de f0 ne laisse pas apparaitre de modification de fréquence moyenne, ni du vibrato, lors du changement de voyelle. La courbe

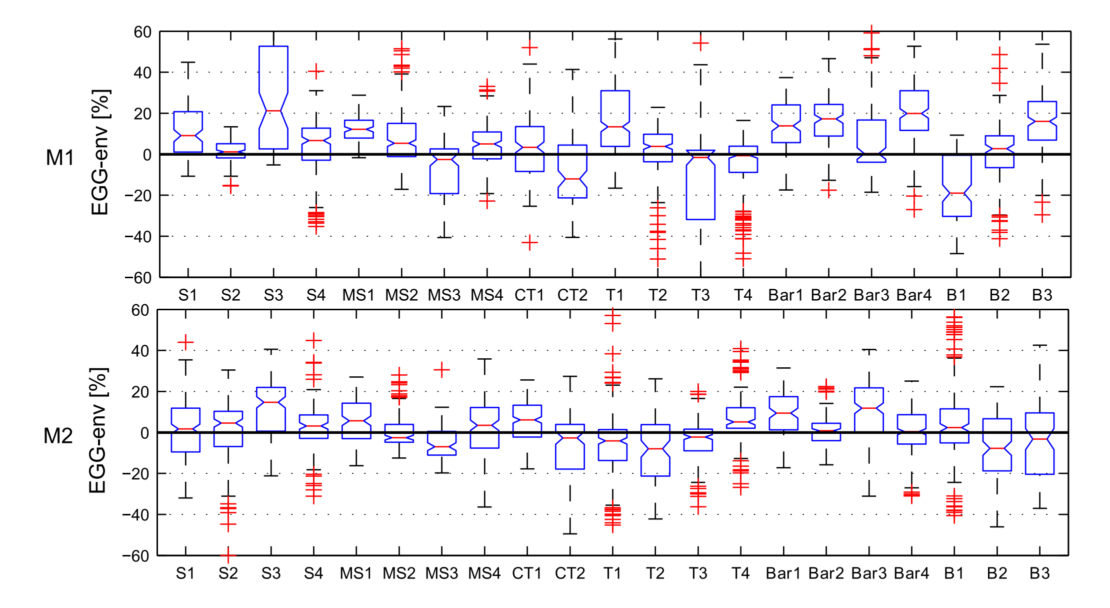



FIG. 6.4 – *Statistiques de la différence d'amplitude du signal EGG entre les productions sur /a/ et celles sur /i/(env(/i/) − env(/a/)), à même hauteur et même intensité, en mécanisme M1 (figure de haut) d'une part, et M2 (figure du bas) d'autre part. Les résultats sont détaillés pour chaque chanteur.*

d'amplitude de l'EGG en revanche, traduit une augmentation de 10% lors du changement de voyelle, ce qui est tout à fait en accord avec les valeurs présentées pour ce chanteur en M2 dans la figure 6.4. Cette figure est particulièrement intéressante, car sur cette production le chanteur n'a globalement pas modifié la position verticale de son larynx avec la voyelle. En effet le VLP varie légèrement, mais pas en même temps que la voyelle, et prend les mêmes valeurs sur /a/ et sur /i/. Cet exemple particulier montre que le changement de voyelle du /a/ vers le /i/ implique une augmentation de l'amplitude du signal EGG, qui traduit probablement une augmentation de la surface de contact glottique, en mécanisme M2. À titre de comparaison, nous avons également présenté la figure 6.6, qui correspond à une production similaire à celle de la figure 6.5. Il s'agit d'un passage de la voyelle /a/ au /i/, toujours par CT1 en M2 sur le do3. Nous constatons aussi l'augmentation de l'amplitude de l'EGG lors du changement de voyelle, mais ce changement est ici associé à une diminution du VLP. La situation la plus rencontrée est celle présentée figure 6.6 avec une variation de VLP lors de la transition, mais la figure 6.5 nous permet d'affirmer que la modification d'amplitude de l'EGG tient bien d'une modification de la surface des cordes vocales et non d'une variation de la position verticale du larynx.

Nous nous en tiendrons provisoirement à ces constatations. En effet la discussion de ces résultats nécessite préalablement d'étudier la position verticale du larynx. Nous reviendrons sur l'amplitude du signal EGG dans la partie 6.2.3.

## 6.2 Phonétogramme et position verticale du larynx

La position verticale du larynx est l'objet d'une attention particulière de beaucoup de professeurs de chant. Selon bien des méthodes de chant le larynx doit être maintenu bas (dans le chant lyrique) par rapport à la position de repos ou la position de parole, ce qui a été observé dans plusieurs études (Shipp, 1987; Shipp et Izdebski, 1975; Sundberg, 1970; Pillot, 2004). Certains styles musicaux requièrent au contraire un larynx haut. Physiologiquement, la position du larynx est très importante car d'une part elle peut influencer la vibration glottique, d'autre part elle permet au chanteur de modifier légèrement la longueur de son conduit vocal (donc les fréquences formantiques). Dans cette partie, nous allons chercher à déterminer si la voyelle influence la position verticale du larynx, et si cette influence est la même en mécanisme M1 et en M2. Cette étude nécessite de déterminer au préalable si la position verticale du larynx varie

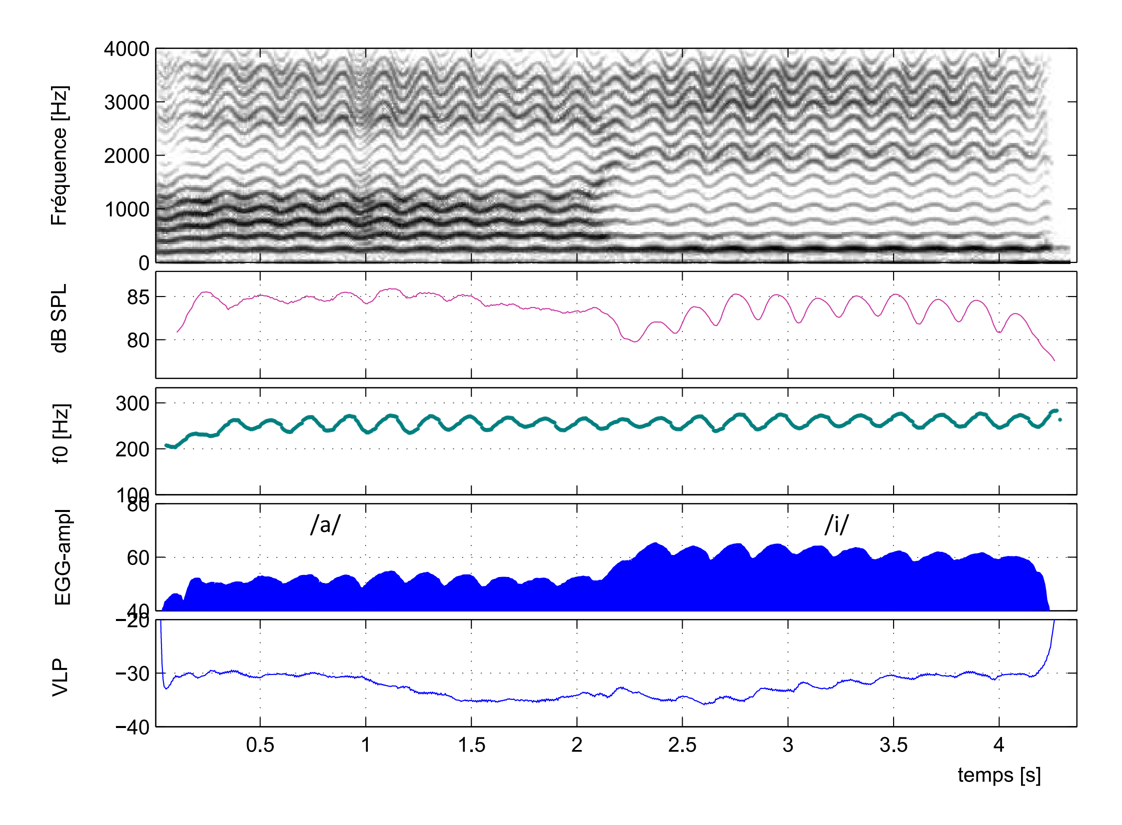



Fig. 6.5 – *Exemple de note tenue chantée par CT1, avec changement de voyelle (début sur /a/, fin sur /i/). Note : do3, mécanisme M2 (exemple sonore 5).*

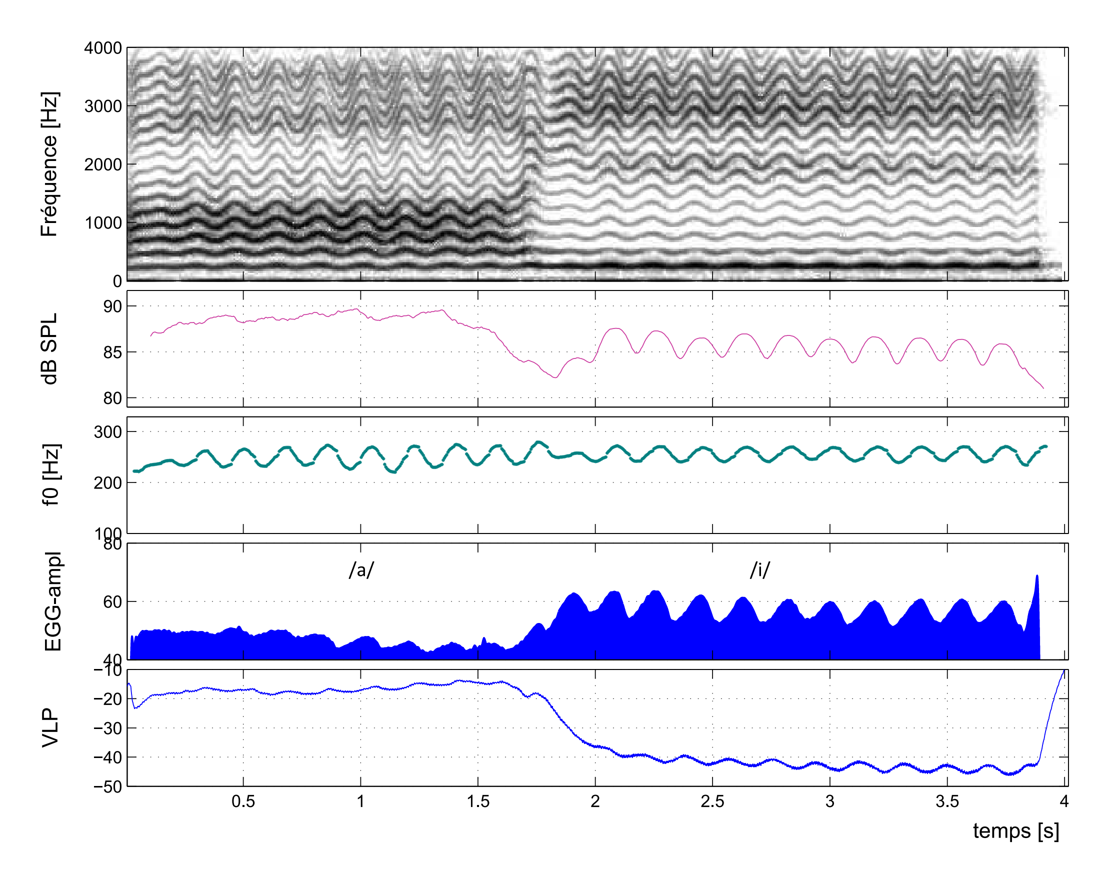



Fig. 6.6 – *Deuxième exemple de note tenue chantée par CT1, avec changement de voyelle (début sur /a/, fin sur /i/). Note : do3, mécanisme M2 (exemple sonore 6). Contrairement à la production présentée figure 6.5, la variation de l'amplitude du signal EGG s'accompagne d'une variation de position verticale du larynx.*

avec la hauteur et l'intensité.

**VLP et hauteur, intensité**

Chez des sujets non-chanteurs, la position du larynx est habituellement corrélée à la hauteur (Shipp et Izdebski, 1975; Shipp, 1975). Chez les chanteurs il en va autrement. Pabst et Sundberg (1993) ont effectué des mesures de la position verticale du larynx à l'aide d'un électroglottographe. Ils ont travaillé avec trois chanteuses et quatre chanteurs (sans distinguer les mécanismes laryngés). Ils n'ont pas décelé de dépendance du VLP avec la hauteur chez les hommes, ni chez les femmes dans «le grave» de leur tessiture. Ces résultats sont en accord avec ceux de Shipp *et al.* (1984) et de Neuschäfer-Rube *et al.* (1996). La dépendance à l'intensité leur est aussi apparue très dépendante du sujet.

**VLP et voyelles**

Dans le domaine de la parole, Ahmad *et al.* (2009) ont établi par des mesures IRM que le larynx était plus haut sur /i/ que sur /a/ et /u/ (travaillant avec cinq hommes et cinq femmes comme sujets). Sundberg (1970) observe la même tendance en voix parlée, ainsi qu'en voix chantée dans une moindre mesure. Selon lui, comme le larynx est maintenu dans une position basse dans le chant, ses mouvements dus aux voyelles sont réduits. Notons que Sundberg a travaillé avec quatre basses, chantant vraisemblablement en M1 (et à partir d'images du conduit vocal obtenues par rayons X). Pillot (2004) a trouvé que le larynx était statistiquement significativement plus haut sur /i/ que sur /a/ et /u/ dans le chant, alors que la position de l'os hyoïde reste la même. Elle a travaillé avec un sujet (basse), à 100 Hz et 150 Hz, donc aussi en mécanisme M1, en effectuant une IRM du conduit vocal. Elliot *et al.* (1997) trouvent des résultats similaires, en ayant travaillé avec cinq sujets, trois hommes et deux femmes (et en ayant mesuré le VLP avec l'EGG). La hauteur à laquelle les productions ont été effectuées n'est pas précisée.

Globalement, il semble donc que la tendance observée dans la parole se retrouve dans une certaine mesure dans le chant, en notant cependant que ces études ont été effectuées dans le grave, vraisemblablement en mécanisme M1. Nous allons donc voir si nous retrouvons cette tendance en mécanisme M1, et si elle se vérifie en mécanisme M2.

**VLP et mécanismes laryngé**

L'influence du mécanisme laryngé sur le VLP n'a pas encore été étudiée. Comme nous l'avons mentionné dans le paragraphe précédent, les recherches ont toutes porté sur de la voix grave, que nous attribuons donc au mécanisme M1. Nous allons voir comment le mécanisme influence la position verticale du larynx, pour pouvoir ensuite observer les différences d'influence de la voyelle entre les mécanismes M1 et M2.

### 6.2.1 Variation du VLP avec la hauteur et l'intensité

Le tableau 6.4 présente les coefficients de corrélation partielle mesurés sur la base de données. Parmi l'ensemble des valeurs relevées, seules huit corrélations fortes sont observées. Sept d'entre elles portent sur la corrélation entre le VLP et la hauteur en mécanisme M1, mais deux sont négatives et les cinq autres positives.

Nous observons également qu'aucune régularité n'apparait dans le tableau concernant le signe des coefficients.

Bien que contenant des données intéressantes (nous pouvons par exemple dire que S1, S2, MS1 et MS3 ont tendance à baisser leur larynx quand elles augmentent d'intensité en mécanisme M2), ce tableau ne nous permet pas de mettre en évidence une quelconque tendance globale, conformément aux études effectuées précédemment sans prendre en compte les mécanismes laryngés. Nous pouvons déduire de notre étude qu'il n'existe pas de tendance claire quand à la variation de la hauteur du larynx avec la hauteur ou l'intensité, que ce soit en mécanisme M1 ou en M2.

| | M1 | | M2 | |
|---|---|---|---|---|
| chanteur | $f_0$ | $Idb$ | $f_0$ | $Idb$ |
| S1 | -0.01 | -0.04 | -0.10 | -0.44 |
| S2 | **0.79** | 0.03 | -0.40 | -0.33 |
| S3 | **-0.84** | 0.53 | -0.32 | 0.15 |
| S4 | 0.60 | 0.08 | 0.44 | 0.23 |
| MS1 | **0.82** | -0.26 | 0.36 | -0.55 |
| MS2 | -0.00 | 0.13 | 0.30 | 0.21 |
| MS3 | 0.18 | -0.50 | -0.67 | -0.50 |
| MS4 | -0.27 | 0.33 | -0.42 | 0.55 |
| CT1 | -0.45 | 0.02 | **-0.83** | 0.23 |
| CT2 | **0.75** | 0.37 | -0.63 | -0.10 |
| T1 | -0.40 | -0.17 | 0.11 | -0.22 |
| T2 | -0.69 | 0.47 | -0.13 | -0.03 |
| T3 | **0.76** | -0.35 | 0.12 | -0.30 |
| T4 | **-0.71** | -0.17 | -0.41 | -0.35 |
| Bar1 | 0.68 | -0.27 | 0.27 | 0.19 |
| Bar2 | -0.27 | 0.07 | 0.27 | -0.57 |
| Bar3 | **0.71** | -0.50 | -0.61 | -0.34 |
| Bar4 | -0.04 | 0.31 | 0.39 | -0.02 |
| B1 | -0.49 | 0.00 | 0.45 | -0.52 |
| B2 | -0.04 | 0.11 | -0.23 | 0.17 |
| B3 | 0.43 | -0.24 | -0.04 | 0.23 |

TAB. 6.4 – *Coefficients de corrélation partielle entre le VLP, la hauteur (en demi-tons) ou l'intensité, pour chaque chanteur, chaque mécanisme laryngé. Les corrélations fortes (supérieures à 0.7 en valeur absolue) figurent en gras. Voyelle : /a/.*

### 6.2.2 Influence du mécanisme laryngé

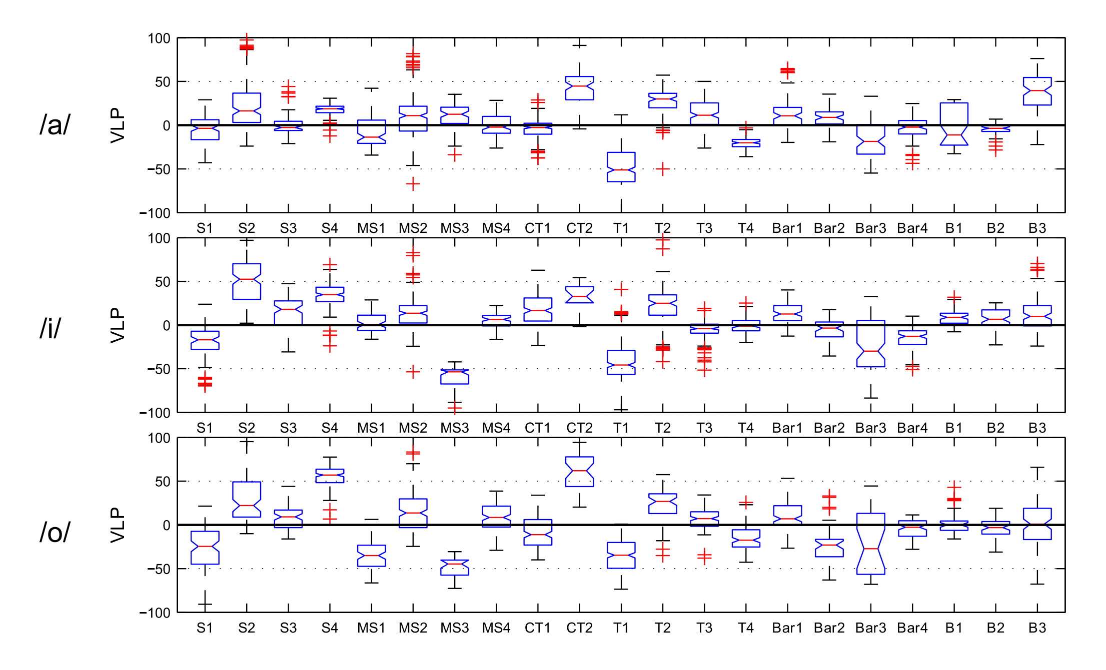



FIG. 6.7 – *Statistiques de la différence de VRP entre les productions de M1 et celles de M2 ($VLP(M1) - VLP(M2)$), à même hauteur et même intensité. Les résultats sont détaillés pour chaque chanteur et chaque voyelle.*

La figure 6.7 présente la différence observée de VLP entre les productions de M1 et celles de M2, dans la zone de recouvrement. Comme pour le tableau 6.4, nous pouvons observer une grande variabilité des résultats, qui peuvent être très marqués dans certains cas. Par exemple, la tendance qu'a T1 à chanter avec un larynx plus haut en M2 qu'en M1 sur la voyelle /o/ ne fait aucun doute. La position du larynx dans le chant serait donc très personnelle.

Si nous étudions les chanteurs de mécanisme M2 (femmes et contre-ténors) par rapport aux autres, nous constatons que les premiers sont cinq sur dix à avoir un larynx plus bas en M2 qu'en M1 sur /a/ et /o/, et sept sur dix sur la voyelle /i/. Les chanteurs de M1 sont cinq sur onze sur /a/ et sur /i/ et trois sur /o/ dans cette situation. Les chanteurs de M2 auraient donc tendance à abaisser plus leur larynx en M2 qu'en M1 (dans la zone de recouvrement des mécanismes), et ce serait l'inverse pour les chanteurs de M1. Cette tendance mériterait d'être confirmée par des méthodes plus fiables d'estimation de la position du larynx.

### 6.2.3 Influence de la voyelle

La figure 6.8 présente l'ensemble des valeurs médianes, des intervalles interquartiles et des valeurs adjacentes supérieures et inférieures des différences de VLP observées à hauteur et intensité fixées, entre les voyelles /a/ et /i/, en M1 d'une part, et en M2 d'autre part. Cette figure confirme naturellement les descriptions déjà détaillées sur la position verticale du larynx : celle-ci dépend du chanteur, et l'influence de la voyelle dépend également du chanteur : il y a des chanteurs comme S3 (en mécanisme M1) qui émettent un /a/ avec un larynx plus haut que quand ils émettent un /i/, d'autres comme Bar2 pour lesquels ce n'est pas le cas.

Parmi les chanteurs de mécanisme M2, nous constatons que quatre d'entre eux (S2, S3, MS1, CT2) chantent avec un larynx plus haut sur /i/ que sur /a/ en M1, seules S1 et MS3 montrent clairement une tendance inverse. Ils sont six (S1, S4, MS1, MS2, MS4, CT1) à avoir le larynx plus bas sur /i/ que sur /a/ en M2. Les chanteurs de M1 sont six (T1, T4, Bar1, Bar4, B1, B2) à avoir le larynx plus haut sur /i/ en M1, et sept (T2, T3, Bar1, Bar2, Bar4, B2, B3) en M2. La tendance «majoritaire» semble être partagée en M1 entre les deux catégories de chanteurs, mais opposée en M2 : les chanteurs de M2 semblent plutôt chanter avec un larynx plus bas sur /i/ que sur /a/, alors que c'est l'inverse pour les chanteurs de M1 (qui sont donc non entrainés

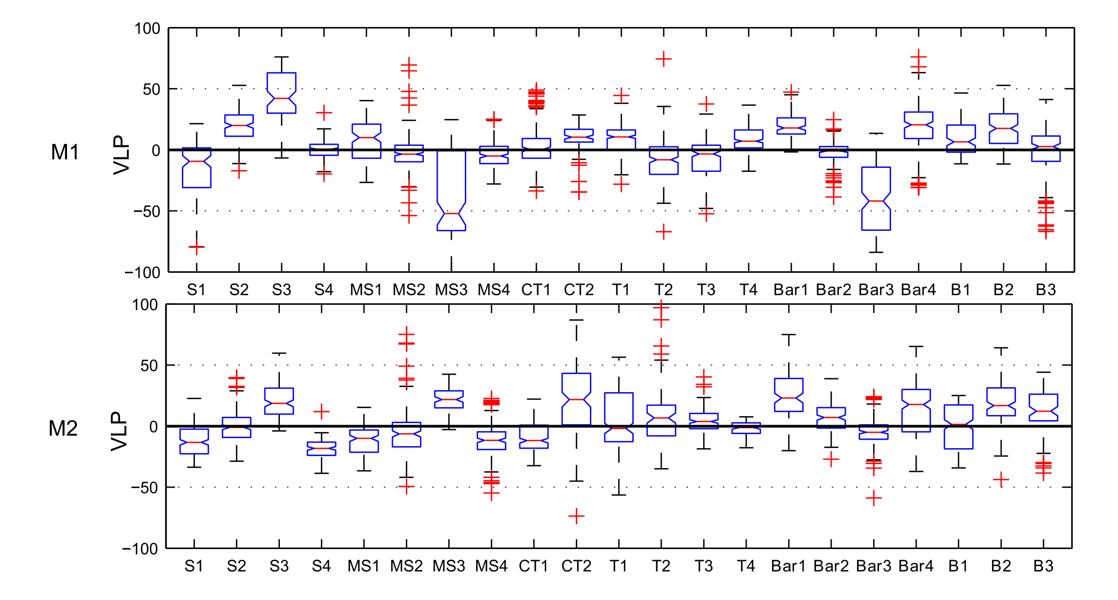



FIG. 6.8 – *Statistiques de la différence de VLP entre les productions sur /a/ et celles sur /i/($VLP(/i/) - VLP(/a/)$), à même hauteur et même intensité, en mécanisme M1 (figure de haut) d'une part, et M2 (figure du bas) d'autre part. Les résultats sont détaillés pour chaque chanteur.*

en M2).

Notre étude montre donc que la tendance générale décrite dans la littérature ne vaut que pour le mécanisme M1. En mécanisme M2, les personnes entrainées dans ce mécanisme montrent plutôt la tendance inverse. Le mécanisme laryngé, associé à l'utilisation que les chanteurs en ont, influence donc la position verticale du larynx.

**Voyelle, VLP, amplitude de l'EGG : Discussion**

La différence entre voix parlée et voix chantée vient en partie des différences articulatoires entre les voyelles parlées et chantées. Cette différence est particulièrement importante pour la voyelle /i/ en terme de position de la langue, donc de forme du conduit vocal (Sundberg, 1970). La position abaissée du larynx en voix chantée tend également à abaisser les fréquences des formants (Sundberg et Nordström, 1976).

Les relations entre voyelles et larynx peuvent être de plusieurs types. Nous développerons particulièrement les aspects acoustiques et physiologiques.

Les aspects acoustiques sont décrits en termes d'interaction source-filtre. Nous savons que le formant tuning correspond à une situation recherchée dans le chant (voir partie 1.4.2). Titze (2004) a montré en modélisant les impédances sous-glottique, sus-glottique et glottique que l'ajustement d'un harmonique juste sous un formant impliquait une augmentation de MFDR (Maximum Flow Declination Rate, équivalent au paramètre d'excitation maximale E de Doval *et al.*, 2006). Ce paramètre correspond à la vitesse du débit glottique au moment où la glotte se referme. Théoriquement donc, la voyelle /i/, dont la fréquence du premier formant est beaucoup plus basse que celle du /a/, devrait être émise avec un MFDR plus grand que /a/ (le reste étant constant). Il est intéressant de constater que nous avons trouvé une surface de contact globalement plus grande sur /i/ que sur /a/. Une étude complémentaire est néanmoins nécessaire pour établir si il y a ou non une relation de cause à effet entre ces deux résultats.

En termes de physiologie, nous savons que la langue et le larynx ne sont pas indépendants (cf. section 1.1). La langue est reliée à l'os hyoïde, qui est un os indépendant du reste du squelette. Ce dernier est lui-même relié au larynx, par le muscle thyro-hyoïdien. La position verticale du larynx est régulée par différents muscles extrinsèques : la contraction du muscle thyro-hyoïdien a tendance à le faire monter. D'autre muscles extrinsèques comme le sterno-thyroïdien tendent à l'abaisser (Shipp, 1977). Pour une activité donnée du thyro-hyoïdien, le changement de position de langue en passant d'un /a/ au /i/ pourrait expliquer la montée du larynx, notamment en

voix parlée. D'après Sundberg et Nordström (1976), la montée du larynx pourrait être liée à une augmentation de l'adduction des cordes vocales, ce qui expliquerait l'augmentation de la surface de contact que nous avons constatée.

L'influence du mécanisme laryngé est également peu explicite, car très peu d'études ont porté sur la position verticale du larynx en M1 et en M2. Shipp (1975) n'a pas constaté de modifications de l'activité des muscles extrinsèques ni intrinsèques lors d'un passage M1→M2 d'un glissando (alors qu'il a relevé un saut de fréquence). Sonninen *et al.* (1999) ont observé la position du larynx chez une chanteuse entrainée, et ont constaté une modification de la position du larynx lors du «passage» (situé par les auteurs autour de fa3). Une étude approfondie du mécanisme M2 semble faire défaut pour comprendre pourquoi les chanteurs de mécanisme M2 ont plutôt tendance à abaisser leur larynx sur la voyelle /i/ par rapport au /a/.

### 6.2.4 Validité des mesures

L'estimation de la position verticale du larynx par l'électroglottographe à deux électrodes (*two-electrodes-pairs multichanel EGG*) est considérée correcte par Rothenberg (1992) dans la mesure où les électrodes sont placées correctement, c'est à dire que le larynx au repos est centré par rapport aux électrodes, et pour de petits mouvements du larynx, inférieurs à 1.5 cm. Dans cette situation, le signal de *larynx tracking* délivré par l'EGG peut être considéré comme étant directement proportionnel à la position verticale du larynx, exprimé en centimètres.

Elliot *et al.* (1997) ont également utilisé un tel électroglottographe pour estimer la position verticale du larynx. Ils ont testé la validité de la mesure, d'une part en relevant visuellement la variation de position du larynx par rapport à la position de repos, d'autre part en faisant varier la position des électrodes sur le cou. Selon les deux méthodes, les auteurs ont confirmé la validité de la mesure de VLP sous les conditions données par Rothenberg. Laukkanen *et al.* (1999) ont également testé la méthode de mesure du VLP par l'EGG, en effectuant des mesures simultanées avec l'électroglottographe et par vidéofluoroscopie. Ils relèvent une bonne concordance des deux méthodes de mesure dans l'ensemble.

## 6.3 Influence de la voyelle sur le quotient ouvert

Le quotient ouvert est, comme l'amplitude du signal EGG ou la position verticale du larynx, un paramètre glottique. Néanmoins son statut est un peu différent dans la mesure où il peut être également considéré comme un paramètre acoustique. En effet il s'agit aussi d'un des cinq paramètres permettant de décrire la forme d'une onde de débit glottique (cf. partie 1.1.3). De par l'étude de l'influence de la voyelle sur le quotient ouvert en M1 et en M2 que nous allons maintenant présenter, nous verrons ce que cette influence nous apporte quant à l'influence de la voyelle sur les limites phonétographiques.

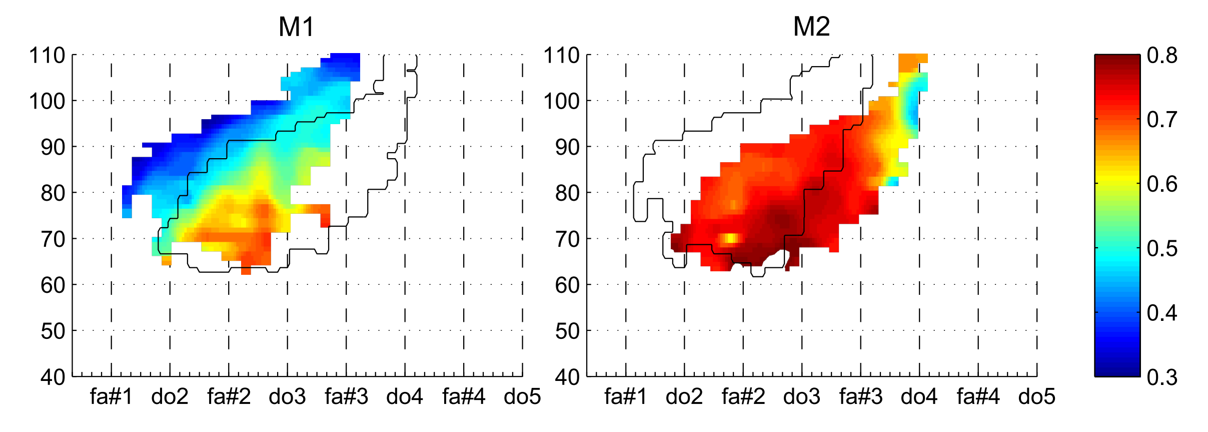



Fig. 6.9 – *Phonétogramme de quotient ouvert, en M1 (gauche) et en M2 (droite). Voyelle : /a/, chanteur : CT1*

Le quotient ouvert a été étudié en détail par Henrich (2001) : le quotient ouvert varie en fonction du mécanisme laryngé. Il prend des valeurs faibles (de 0.3 à 0.8) en M1, et plus grandes (de 0.5 à 0.95) en M2. Le quotient ouvert varie également avec d'autres paramètres : il est inversement corrélé à l'intensité en mécanisme M1, ce qui n'est pas le cas en M2. Il peut être inversement corrélé à la fréquence fondamentale en M2. Un exemple de phonétogramme de quotient ouvert est présenté figure 6.9. Nous pouvons notamment y vérifier la corrélation entre Oq et SPL en mécanisme M1, ainsi que la différence très marquée entre les valeurs mesurées en M1 et en M2. La variation du quotient ouvert avec le mécanisme laryngé, ainsi qu'avec le SPL ou la fréquence n'est pas réétudiée dans ce manuscrit.

Les phonétogrammes de la figure 6.9 ont été obtenues sur la voyelle /a/. Obtenons-nous des résultats similaires sur les autres voyelles ? Dans quelle mesure la voyelle influence-t-elle le quotient ouvert ? Nous allons maintenant détailler la méthode de calcul du quotient ouvert que nous avons utilisée, avant d'exposer les résultats.

### 6.3.1 Méthodes de calcul du quotient ouvert

Il existe plusieurs méthodes de calcul du quotient ouvert, basées ou non sur le signal EGG. La difficulté d'estimation du quotient ouvert réside dans la difficulté d'estimation précise des instants d'ouverture et de fermeture glottique. Plusieurs méthodes existent, basées sur un seuillage de l'EGG, ou sur une détection des pics d'ouverture et/ou de fermeture du signal DEGG. Dans cette thèse, nous avons choisi d'estimer le quotient ouvert par la méthode «decom» développée par Henrich (2001). Cette méthode est basée sur une estimation de la période fondamentale ainsi que de la durée de la phase ouverte en effectuant une auto-corrélation sur le signal DEGG fenêtré. Les largeurs des fenêtres peuvent être fixées a priori. Pour que l'estimation soit optimale, nous avons fixé cette largeur de fenêtre à 3 fois la fréquence fondamentale, qui était donc préalablement estimée.

Comme nous l'avons vu en section 5.4, il existe des zones du phonétogramme pour lesquelles l'électroglottographe ne détecte pas de contact glottique. Dans ces zones, le quotient ouvert calculé n'a pas été pris en considération dans les calculs qui sont présentés.

### 6.3.2 Quotient ouvert, voyelles, mécanismes laryngés : résultats

La figure 6.10 présente une comparaison des valeurs de quotients ouvert mesurés sur les voyelles /i/ et /a/, en M1 et en M2, et pour chaque chanteur. En mécanisme M1, nous pouvons constater que vingt des vingt-et-une valeurs médianes sont situées en dessous de zéro. Cela signifie que lorsque l'on compare le quotient ouvert observé entre les voyelles /a/ et /i/ à hauteur et intensité donnée, le quotient ouvert est plus grand sur la voyelle /a/ que sur le /i/. De plus la différence observée est assez importante, elle est proche de 0.1 pour plusieurs chanteurs, ce qui représente 10% de la plage de variation totale du quotient ouvert. En mécanisme M2, nous observons une tendance similaire, mais moins prononcée : cinq chanteurs ont une valeur médiane positive, et seul B2 a une valeur médiane inférieure à -0.05. Le tableau 6.5 présente les valeurs de différences de quotient ouverts moyens sur l'ensemble des 21 chanteurs. Ce tableau confirme la tendance observée, à savoir que le Oq serait plus faible en M1 sur /i/ que sur /a/, et que cette tendance serait moindre en M2. Les figures 6.11 et 6.12 nous permettent d'introduire les quotients ouverts mesurés sur la voyelle /o/. Sur ces deux graphiques, nous constatons que les différences de quotient ouvert sont plutôt positives, mais globalement très proches de zéro en M1 comme en M2. D'après le tableau 6.5, les différences de quotient ouvert obtenus avec la voyelle /o/ sont globalement moins importantes, et inférieures ou très proches des écarts types calculés.

Nous retiendrons qu'en dépit des variabilités mesurées entre les chanteurs, le quotient ouvert est globalement plus faible sur /i/ que sur /a/ en M1 et qu'il n'y a pas de tendance claire se dégageant en M2.

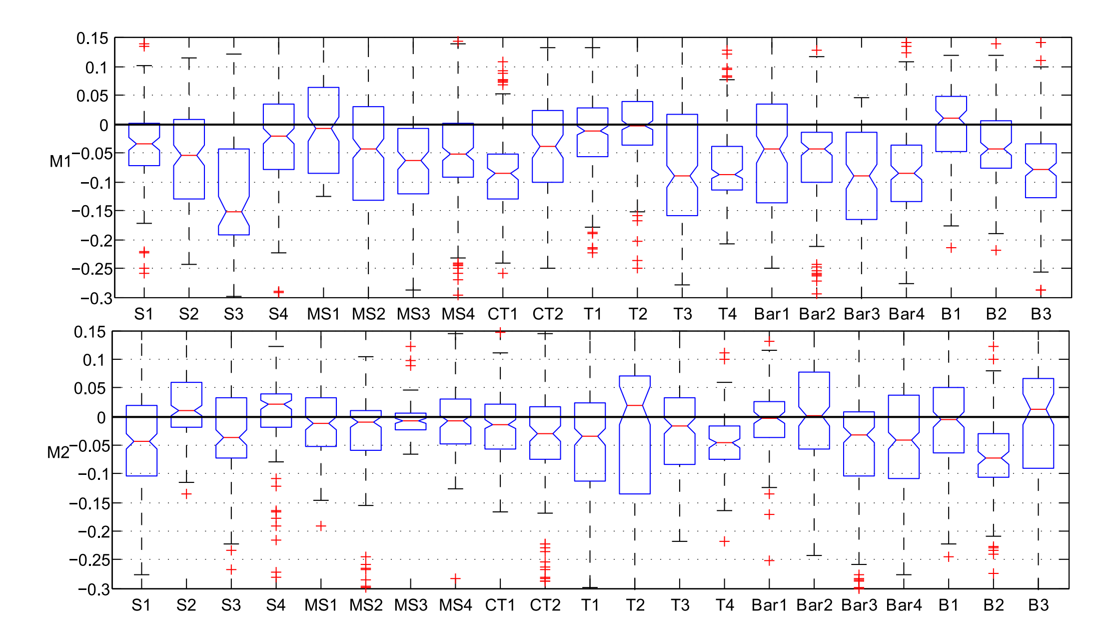



FIG. 6.10 – *Différence de quotient ouvert mesuré entre les voyelles /i/ et /a/ (Oq(/i/) − Oq(/a/)), à hauteur et intensité fixées, pour chaque chanteur. Valeurs médianes (traits rouges), quartiles (boîtes bleues), valeurs supérieures et inférieures adjacentes (moustaches noires), et points «aberrants» (donc situés hors des limites fixées par les valeurs supérieures et inférieures adjacentes) (croix rouges).*

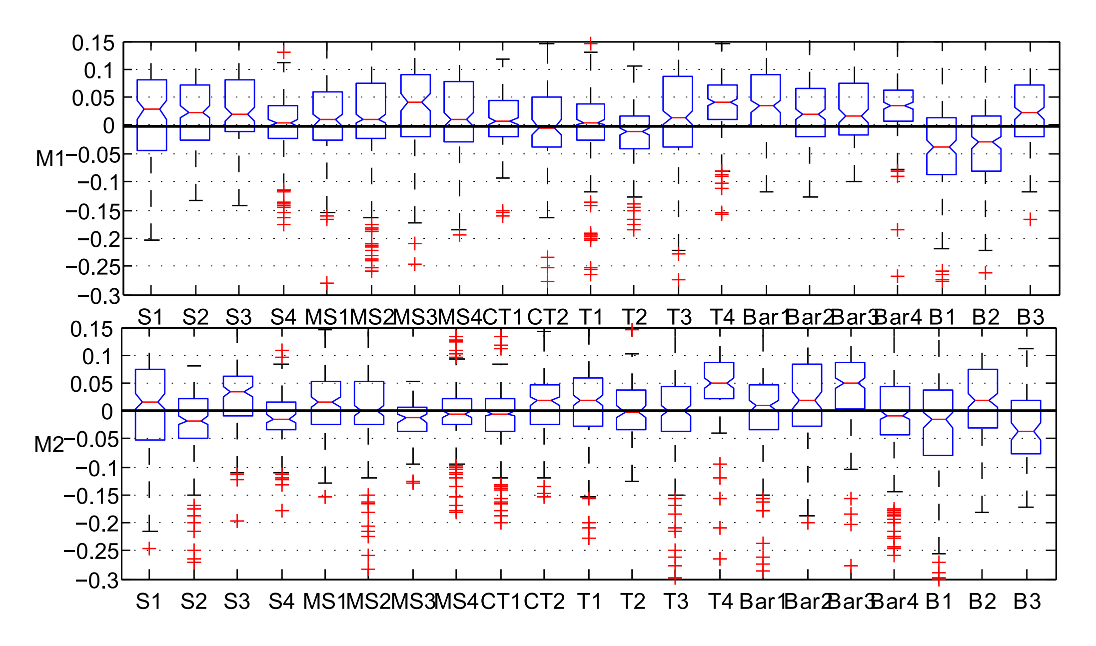



FIG. 6.11 – *Différence de quotient ouvert mesuré entre les voyelles /a/ et /o/ (Oq(/a/) − Oq(/o/)), à hauteur et intensité fixées, pour chaque chanteur. Valeurs médianes (traits rouges), quartiles (boîtes bleues), valeurs supérieures et inférieures adjacentes (moustaches noires), et points «aberrants» (donc situés hors des limites fixées par les valeurs supérieures et inférieures adjacentes) (croix rouges).*

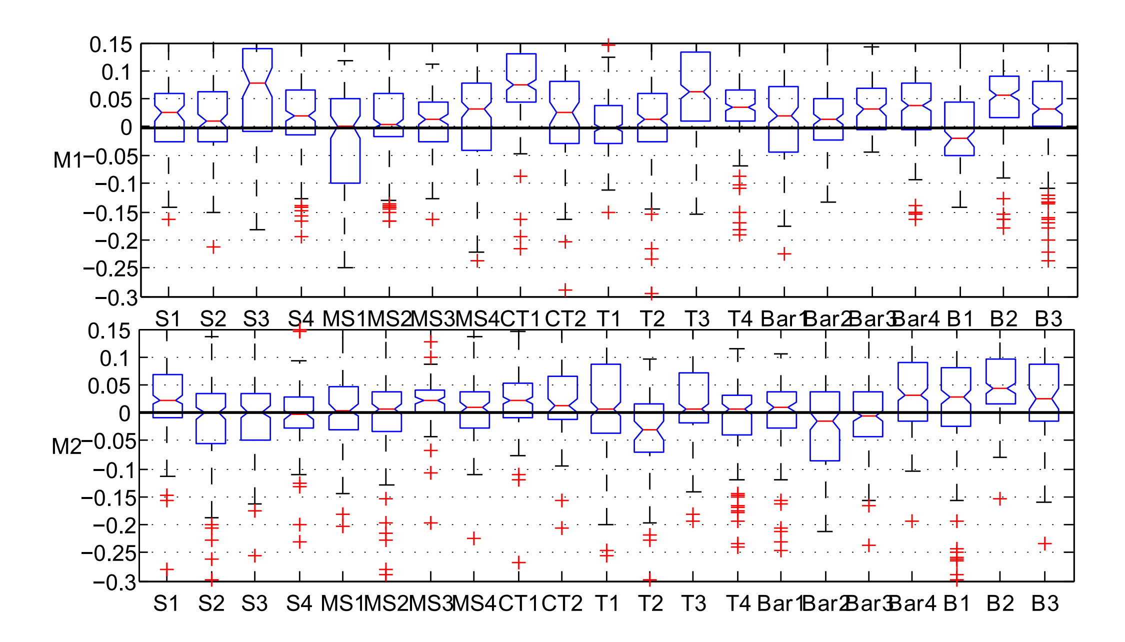



FIG. 6.12 – *Différence de quotient ouvert mesuré entre les voyelles /o/ et /i/ (Oq(/o/)−Oq(/i/)), à hauteur et intensité fixées, pour chaque chanteur. Valeurs médianes (traits rouges), quartiles (boîtes bleues), valeurs supérieures et inférieures adjacentes (moustaches noires), et points «aberrants» (donc situés hors des limites fixées par les valeurs supérieures et inférieures adjacentes) (croix rouges).*

| | | Moyennes | Écarts types |
|---|---|---|---|
| Oq(/i/)-Oq(/a/) | M1 | -0.053 | 0.038 |
| | M2 | -0.017 | 0.024 |
| Oq(/a/)-Oq(/o/) | M1 | 0.012 | 0.021 |
| | M2 | 0.007 | 0.022 |
| Oq(/o/)-Oq(/i/) | M1 | 0.027 | 0.025 |
| | M2 | 0.010 | 0.017 |

TAB. 6.5 – *Valeurs moyennes et écarts types des différences de quotients ouverts médians (présentés figures 6.10, 6.11 et 6.12), mesurées entre deux voyelles (à savoir /i/ et /a/, /a/ et /o/, et /o/ et /i/), à même hauteur et même intensité.*

### 6.3.3 Discussion des résultats

Cherchons à comprendre ces différences de quotient ouvert observées entre /i/ et /a/ en M1, et dans une moindre mesure en M2. D'autres comparaisons de quotient ouvert en fonction de la voyelle ont déjà été effectuées. Henrich (2001) a étudié l'influence de la voyelle sur le quotient ouvert sur 18 sujets chanteurs, et a trouvé un quotient ouvert légèrement plus grand sur /a/ que sur /e/ et que sur /u/ en M1, ainsi que en M2 de façon non significative (statistiquement). Ce résultat est très proche du nôtre.

Nous savons que le quotient ouvert est habituellement corrélé à l'intensité en M1 et pas en M2. Par ailleurs l'intensité est un paramètre du son rayonné, alors que le quotient ouvert est un paramètre glottique; la relation physique n'est donc pas immédiate et est susceptible de varier en fonction de la voyelle. En termes de fonctionnement glottique, il semble pertinent de chercher des corrélations entre le quotient ouvert et un (ou plusieurs) paramètre(s) glottique(s).

**Pression sous-glottique et intensité**

De nombreuses études se sont intéressées aux variations de pression sous-glottique. Ce paramètre est connu pour avoir une incidence directe sur le fonctionnement glottique, et pour être assez fortement lié à la notion d'intensité vocale (Sundberg, 1987; Sundberg *et al.*, 1999, 1993; Stone *et al.*, 2003; Titze, 1992, 1994), la pression étant habituellement estimée à partir de la pression intra-orale. Sundberg *et al.* (1999) ont ainsi suggéré qu'un doublement de pression sous-glottique causerait une augmentation de 9.9 dB de l'intensité. Sundberg *et al.* (1993) avaient trouvé 11.1 dB, en précisant qu'il s'agit de valeurs moyennes cachant une grande variabilité des comportements entre sujets. D'ailleurs, Plant et Younger (2000) ont étudié la variation de pression sous-glottique (par mesure directe) chez 9 hommes non-chanteurs, à la fois en fonction de la hauteur et de l'intensité (donc dans un plan phonétographique). Ils ont aussi globalement relevé cette corrélation entre intensité et pression sous-glottique chez leurs sujets. Il est intéressant de remarquer que ces études sont basées sur des observations effectuées sur des hommes, donc utilisateurs du mécanisme M1. Stone *et al.* (2003) ont travaillé avec un sujet féminin, mais se sont limités à des productions de registre modal (donc probablement utilisant le mécanisme M1). Sundberg et Högset (2001) ont étudié les pressions sous-glottiques utilisées par des ténors (chantant habituellement en M1) et des contre-ténors (pouvant donc utiliser les mécanismes M1 et M2). Ils ont montré que pour leurs sujets, les pressions sous-glottiques étaient plus faibles en registre «falsetto» qu'en registre «modal» (donc vraisemblablement en M2 qu'en M1), et que, dans un cas comme dans l'autre, elles augmentent avec l'intensité. Sa mesure a aussi été indirecte, et la voyelle étudiée est le /ae/. Concernant le mécanisme M2, Tom et Titze (2001) ont mesuré la pression sous-glottique et le quotient ouvert chez un contre-ténor. Ils ont observé, en mécanisme M2 (dénommé registre falsetto par les auteurs) que la pression sous-glottique était responsable de plus de 90 % des variations d'intensité et que le quotient ouvert restait très constant. Retenons donc que le quotient ouvert est inversement corrélé à l'intensité ainsi qu'à la pression sous-glottique en mécanisme M1, mais que seule la pression sous-glottique est corrélée à l'intensité en M2.

**Relations entre la pression sous-glottique, le quotient ouvert, les voyelles et les mécanismes**

Quant aux relations entre voyelles et pression sous-glottique, Bucella *et al.* (2000) ont mesuré sur de la parole (donc vraisemblablement en mécanisme M1) les pressions sous glottiques usuelles, et ont trouvé des valeurs supérieures sur /i/ à celles sur /a/. Randi (2008) a mesuré directement la pression sous-glottique d'un contre-ténor en M1 et en M2, sur plusieurs voyelles (dont /a/ et /i/), ainsi que le quotient ouvert. Elle constate également des valeurs plus faibles de pression sous-glottique sur /a/ que sur /i/ pour des valeurs de quotient ouvert identiques sur des productions fortissimo de M1.

En mécanisme M1 et à intensité fixée, d'après Randi (2008), l'appareil vocal nécessite donc une pression sous-glottique plus importante sur /i/ que sur /a/. Cela permet, pour une pression donnée, d'obtenir des productions plus fortes sur /a/ que sur /i/. Dans notre étude phonéto-

graphique, nous avons effectivement observé des différences d'intensité maximales sur /i/ et sur /a/. Correspondent-elles à une même pression sous-glottique ? Nous ne pouvons pas répondre dans l'absolu dans la mesure où nous n'avons pas mesuré la pression sous-glottique, mais nous avons étudié le quotient ouvert qui, en mécanisme M1, serait corrélé à la pression sous-glottique. Nous avons donc étudié les valeurs de quotient ouvert observées sur les limites supérieures des phonétogrammes de M1, sur /a/ et sur /i/. Les résultats sont présentés figure 6.13. Nous observons que la différence de quotient ouvert, sur la limite supérieure, entre /a/ et /i/ est très faible sur toute la tessiture étudiée, ce qui tend à renforcer l'hypothèse que nous avons proposée. La différence de limites supérieure, en M1, serait alors simplement due au fait que pour une pression sous-glottique donnée, le /i/ rayonne moins d'énergie que le /a/ du fait des différences de fréquences formantiques.

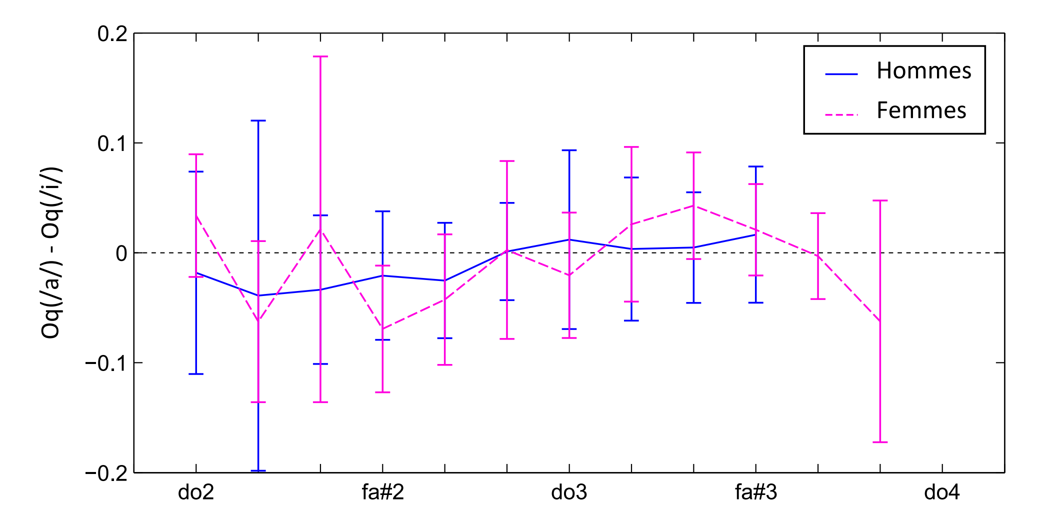



FIG. 6.13 – *Différence de quotient ouvert (Oq(/a/) - Oq(/i/)) mesurée sur les limites supérieures des phonétogrammes de M1. Les résultats obtenus chez les hommes et chez les femmes sont présentés séparément.*

En mécanisme M2, Randi a mesuré des pressions identiques avec des quotients ouvert identiques sur /i/ et /a/. Nous avons observé des quotients ouvert proches sur ces deux voyelles en M2, ainsi que des limites supérieures de phonétogrammes identiques. Ce constat semble traduire le fait que les corrélations entre pression sous-glottique, intensité et quotient ouvert ne sont pas les mêmes qu'en M1. Néanmoins nous manquons de données sur le fonctionnement du mécanisme M2 pour avancer une hypothèse explicative plus argumentée.

Il semble alors cohérent de chercher à comprendre si les différences de quotient ouvert que nous avons constatées en M1 et pas (ou dans une moindre mesure) en M2 permettent d'expliquer les différences sur les limites supérieures des phonétogrammes.

## 6.4 Liens entre le quotient ouvert et les limites des phonétogrammes

Nous savons que le quotient ouvert est corrélé à la différence d'énergie des deux premières harmoniques de l'onde de débit glottique (le résultat est avéré sur des signaux de parole, cf. Hanson, 1997; Fant, 1995). En conséquence, le quotient ouvert est lié au niveau SPL. En M2, le quotient ouvert est plus grand qu'en M1, ce qui se traduit au niveau spectral par plus d'énergie dans le premier harmonique que dans le deuxième, alors que c'est l'inverse en M1. Nous avons cherché à savoir dans quelle mesure la différence de quotient ouvert entre les mécanismes M1 et M2 pourrait expliquer les différences d'influence de la voyelle sur les limites supérieures des phonétogrammes en mécanismes M1 et M2.

Dans le cadre de la théorie source-filtre linéaire, nous pouvons écrire :

$$S_{M1}(f) = Ug_1(f).V_1(f).L_1(f)$$

$$S_{M2}(f) = Ug_2(f).V_2(f).L_2(f)$$

où, dans le mécanisme laryngé $M_i$, ( $i = 1$ ou 2 ), $S_{Mi}(f)$ correspond au spectre du signal vocal rayonné, $Ug_i$ à celui du signal de source, $V_i$ au filtre du conduit vocal et $L_i$ au rayonnement aux lèvres. Si l'on fait l'hypothèse que les filtres ainsi que le rayonnement aux lèvres sont les mêmes en M1 et en M2, c'est à dire si $V_1(f) = V_2(f) = V(f)$ et $L_1(f) = L_2(f) = L(f)$, on obtient :

$$S_{M2}(f) = \frac{Ug_2(f)}{Ug_1(f)}.Ug_1(f).V(f).L(f) = \frac{Ug_2(f)}{Ug_1(f)}.S_{M1}(f)$$

donc la connaissance de $Ug_1$ et de $Ug_2$ permettrait de reconstruire le signal de M2 à partir de celui de M1.

Notre but étant de tester l'effet de la différence de quotient ouvert entre M1 et M2 sur le SPL, nous avons mesuré le quotient ouvert sur les limites supérieures des phonétogrammes en M1 et en M2, pour les trois voyelles séparément, pour chaque chanteur et sur chaque note. Nous avons ensuite utilisé ces valeurs mesurées de quotient ouvert et de fréquence fondamentale pour simuler, dans chacun de ces cas, les spectres $Ug_1$ et $Ug_2$ en utilisant un modèle LF (Fant *et al.*, 1985). Mis à part le quotient ouvert et la fréquence fondamentale, les autres paramètres ont été fixés arbitrairement ($\alpha_m = 0.65$, $E = 1$, $TL = 3\,dB$ ; pour un développement plus ample, le lecteur peut se référer à Doval *et al.*, 2006). Ensuite, le filtre synthétique dont la réponse en fréquence correspond à $Ug_2(f)/Ug_1(f)$ a été appliqué à $S_{M1}$ pour obtenir le signal simulé $S_{M2,sim}$, correspondant au signal $S_{M1}$ dont seul le quotient ouvert a été modifié.

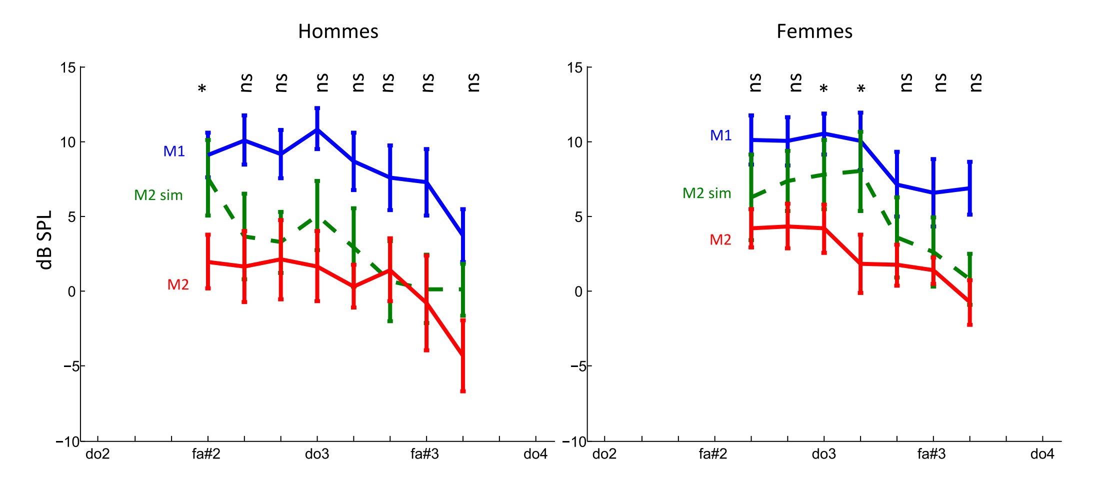



FIG. 6.14 – *Différence des limites supérieures des phonétogrammes obtenues sur /a/ et /i/ ($SPL(/a/) - SPL(/i/)$), en M1 et en M2 (traits pleins), et par modification de quotient ouvert à partir des données du mécanisme M1 (traits pointillés). Le test statistique présenté porte sur la différence entre la courbe de M2 mesurée et celle simulée (Détails des tests en annexe A, tableau A.12 p. 164).*

Nous avons ensuite mesuré pour chaque production le SPL des signaux $S_{M2,sim}$. La figure 6.14 présente, pour M1, pour M2 et pour le résultat de la simulation, les différences moyennes de SPL mesurées pour chaque note entre les productions sur /a/ et celles sur /i/. Comme nous l'avons déjà vu, ces valeurs sont proches de 10 dB en M1 et de 0 dB en M2, pour les hommes comme pour les femmes. La courbe obtenue par simulation est tracée en pointillés. Nous constatons que la modification de quotient ouvert diminue fortement la différence d'intensité. La différence entre la limite de M2 simulée et celle mesurée ne reste statistiquement significative pour les femmes que sur deux notes, et pour les hommes que sur une. Nous pouvons en conclure que d'après

ce modèle, la différence de quotient ouvert entre M1 et M2 explique une part importante de la différence d'influence de la voyelle sur les limites supérieures des phonétogrammes de M1 et de M2. D'autres facteurs peuvent intervenir pour expliquer la différence résiduelle : soit un autre paramètre de source varie en fonction des mécanismes laryngés et a une influence sur le SPL, soit le modèle source-filtre linéaire est insuffisant et il faudrait prendre en compte les non-linéarités dans le couplage entre la source et le filtre pour expliquer le phénomène observé.

## 6.5 Bilan du chapitre

Nous avons étudié les variations de l'amplitude du signal EGG (décrivant la surface de contact maximale des cordes vocales au cours du cycle glottique), de la position verticale du larynx et du quotient ouvert avec l'intensité, la hauteur, le mécanisme laryngé et la voyelle. Nous nous sommes basé sur la présentation de phonétogrammes de ces trois paramètres pour comparer l'incidence de la voyelle sur ces paramètres en M1 et en M2. Un résultat est commun aux études des trois paramètres, il s'agit de la grande variabilité inter-sujet. Néanmoins nous avons pu observer les tendances suivantes :

**Amplitude de l'EGG, position verticale du larynx**

L'amplitude de l'EGG :
- augmente avec l'intensité en M2, ainsi qu'en M1 dans une moindre mesure.
- a tendance à diminuer avec la hauteur, mais les coefficients de corrélations sont moins forts (en valeur absolue).
- est plus grande en M1 qu'en M2 à hauteur et intensité données.
- a tendance à être plus grande sur /i/ que sur /a/, dans les deux mécanismes laryngés.

La position verticale du larynx :
- ne présente pas de tendance générale en fonction de la hauteur ou de l'intensité.
- tend à être plus basse en M2 qu'en M1, chez les chanteurs de M2.
- est plus basse sur /i/ que sur /a/ en M2 chez les chanteurs de M2, et en M1 pour les chanteurs de M1.

Physiologiquement, cette influence de la voyelle peut être due au lien entre la position de la langue et le larynx via l'os hyoïde.

**Quotient ouvert et explication de l'influence de la voyelle sur les limites des phonétogrammes**

Le quotient ouvert, comparé à hauteur et intensité fixes, est plus faible sur /i/ que sur /a/ en M1, mais pas en M2.

La différence de quotient ouvert observée en M1 pourrait être due à la nécessité d'une pression sous-glottique plus importante sur /i/ que sur /a/ pour produire un son de même hauteur et intensité, ce qui ne serait pas le cas en M2. De plus, une simulation numérique nous a permis d'établir que cette différence de quotient ouvert entre des productions de M1 et de M2, expliquait en grande partie la différence d'influence de la voyelle sur les limites supérieures des phonétogrammes de M1 et de M2.

## Troisième partie

# Etude de paramètres spectraux

# Chapitre 7

# La répartition de l'énergie dans le spectre vue dans le phonétogramme

Nous allons maintenant étudier l'incidence des voyelles sur le spectre sonore, dans les deux mécanismes laryngés M1 et M2.

La voyelle est un élément constitutif du spectre. Les fréquences des deux premiers formants sont comprises entre 200 et 2000 Hz environ pour les hommes, et jusqu'à 2400 Hz pour les femmes. Au dessus se trouve une région fréquentielle correspondant à la zone de sensibilité maximale de l'oreille. Les chanteurs lyriques apprennent à renforcer cette zone de fréquence, qui est donc liée à l'entrainement vocal. La bande correspondant aux fréquences plus aiguës encore a été peu étudiée, probablement car elle n'entre pas en ligne de compte pour l'intelligibilité de la parole et parce qu'elle se situe aux limites des possibilités de modélisation dans le cadre de l'acoustique linéaire. Néanmoins l'oreille humaine perçoit les fréquences jusqu'à 20 kHz, donc les harmoniques présentes au delà de 5 ou 6 kHz peuvent être perçues par l'homme et peuvent donc avoir de l'importance dans la perception du timbre de la voix (Ternström, 2008).

En termes de production vocale, le son rayonné résulte naturellement de la combinaison du signal glottique avec le filtrage effectué au niveau des cavités résonantielles. A priori donc, les voyelles comme les mécanismes laryngés influencent le spectre sonore. Nous allons voir si la voyelle influence de la même façon le spectre en mécanismes M1 et M2. Pour cela, nous allons dans un premier temps voir comment décrire le spectre, avant de présenter nos résultats quant aux paramètres choisis.

## 7.1 Paramètres de description du spectre

Il existe une grande variété de paramètres pour décrire le spectre sonore. De fait, la répartition spectrale de l'énergie est souvent associée au timbre vocal, alors que nous connaissons mal les paramètres acoustiques corrélés aux dimensions perceptives permettant de le décrire. Le spectre sonore renferme des informations très pertinentes à l'oreille, mais difficile à mesurer ou à expliciter en termes de paramètres. Cette remarque vaut pour toutes les problématiques liées à la mesure de qualités vocales.

Un paramètre supposé pertinent pour décrire acoustiquement le timbre de la voix est la pente spectrale, qui contrôle la décroissance du spectre en fonction de la fréquence. Fant *et al.* (1985) prédit que cette décroissance est de -6 dB/Oct, ou -12 dB/Oct, en fonction de la fréquence et de la valeur du paramètre $Q_a$ (défini dans le chapitre 1.1.3). Par rapport aux spectres de signaux de parole, ceux observés sur du chant lyrique présentent la singularité d'avoir un renforcement spectral très important autour de 3 kHz. Ce renforcement est appelé formant du chanteur. Un tel renforcement spectral a aussi été observé dans d'autres types de voix projetées, comme chez les acteurs (Nawka *et al.*, 1997). Nous allons détailler ce que nous savons du formant du chanteur et de la pente spectrale, comment ces paramètres sont approchés, et ce que nous savons de leur dépendance à la hauteur, à l'intensité, aux mécanismes laryngés et à la voyelle.

### 7.1.1 Le formant du chanteur et la pente spectrale

**Le formant du chanteur**

Le formant du chanteur correspond à un renforcement de l'énergie vers 3 kHz, rencontré chez les chanteurs et de façon plus générale chez les personnes devant projeter leur voix (par exemple les acteurs, cf. Nawka *et al.*, 1997). Il est connu depuis longtemps dans la littérature scientifique comme un corrélat d'une voix entrainée (Bartholomew, 1934; Winckel, 1971, 1973; Schultz-Coulon *et al.*, 1979a; Seidner *et al.*, 1995; Omori *et al.*, 1996; Mendes *et al.*, 2003; Watts *et al.*, 2006). Il a été observé chez les hommes, ainsi que chez les altos. Chez les sopranos (dans la partie aigüe de la tessiture), il ne serait pas présent (Bartholomew, 1934; Weiss *et al.*, 2001), soit parce que les sopranos développent d'autres méthodes acoustiques pour faire émerger leur voix, soit parce que du fait d'une fréquence fondamentale très aigüe, il n'y a plus assez d'harmoniques dans la bande de fréquences du formant du chanteur pour qu'il soit apparent sur un tracé de spectre. Il a également été observé que le centre fréquentiel ainsi que la bande de fréquences du formant du chanteur varient avec la tessiture. Le formant du chanteur serait ainsi situé à des fréquences plus élevées et serait plus large pour les voix aigües que pour les voix graves (Dmitriev et Kiselev, 1979; Seidner *et al.*, 1983; Bloothooft et Plomp, 1986a; Sundberg, 2001; Pillot et Quattrocchi, 1996).

Au niveau physiologique et acoustique, Sundberg (1974) a attribué le formant du chanteur à un rapprochement des formants 3, 4 et éventuellement 5, ce qui serait accompli par un élargissement du pharynx accompagnant l'abaissement du larynx, ramenant le rapport de section entre tube épilaryngé et pharynx autours de 1/6. Cette hypothèse a ensuite été confirmée (Titze et Story, 1997; Kitamura *et al.*, 2006). Titze et Story (1997) ont également montré que cette modification de l'extrémité du conduit vocal avait une influence forte sur l'onde de débit glottique. Ainsi le formant du chanteur peut difficilement être attribué à la source ou au filtre (seul): la séparation de la source et du filtre, dans le cas du chant, semble donc peu réaliste. En termes techniques, cette difficulté est manifeste pour effectuer du filtrage inverse: le formant du chanteur doit-il être présent dans le filtre ou dans le signal de source?

Nous allons maintenant voir comment est définie la pente spectrale et nous reviendrons sur les difficultés d'analyses du signal de voix chantée.

**La pente spectrale**

La pente spectrale a été beaucoup étudiée, bien qu'il n'existe pas de définition claire et consensuelle à son sujet. Elle doit permettre de décrire la décroissance du spectre. Il existe beaucoup de questions qui doivent être résolues avant de la définir, telles que:

– sur quelle bande fréquentielle est-elle définie? Les modèles de signaux, appliqués à la parole, la définissent entre 0 et 5 kHz. Dans le chant, si l'on décrit par ailleurs l'émergence du formant du chanteur, il n'est pas nécessaire de définir de la sorte la pente spectrale sur le son rayonné puisqu'elle décrirait aussi l'émergence du formant du chanteur.
– sur quel signal la définir? La pente spectrale est souvent estimée sur le son rayonné, or plusieurs publications et modèles la considèrent comme un paramètre de source (Childers et Lee, 1991; Doval *et al.*, 2006). Dans ces conditions se pose pour nous le problème du filtrage inverse, qui n'est pas utilisable sur l'ensemble des données recueillies, et qui ne gère pas la question de l'appartenance du formant du chanteur à la source, au filtre, aux deux.

Les méthodes d'estimations et de modélisations traduisent également cette double difficulté. Par exemple, Hanson & collaborateurs (Hanson, 1997; Hanson et Chuang, 1999) ont estimé la pente spectrale par la différence d'amplitude du troisième formant avec le premier harmonique. Cette méthode d'estimation décrit donc plus l'émergence du formant du chanteur que la pente spectrale dans le chant. Sur le signal rayonné, des balances spectrales ont aussi été définies, il s'agit de faire le rapport d'énergie présent dans deux bandes fréquentielles. Nous reviendrons sur ce point dans la partie 7.1.2. Pour approcher la pente spectrale sur la source, Childers et Lee (1991) ont défini le HRF (*Harmonic Richness Factor*), par le rapport de la somme de l'amplitude de toutes les harmoniques de rang supérieur à 1, avec l'amplitude du premier harmonique.

Ce paramètre doit être défini sur le signal de source, car sur le son rayonné l'amplitude du premier harmonique peut varier fortement en fonction de la fréquence du premier formant. Enfin, plusieurs auteurs ayant modélisé la source glottique ramènent la pente spectrale à une fréquence à partir de laquelle la décroissance du spectre passe de 6 dB/Oct à 12 dB/Oct (Doval *et al.*, 2006).

Par ailleurs, nous avons vu à propos du formant du chanteur que l'utilisation du filtrage inverse pose dans le chant la question de son appartenance à la source ou au filtre (seul), et pourrait aussi impliquer une redéfinition de ce qui est appelé pente spectrale. Selon nous, ces questions théoriques ne peuvent pas être résolues à partir de concepts définis dans le domaine de la parole. Nous avons donc choisi, sans entrer dans des problématiques physiologiques portant sur le formant du chanteur ou de la pente spectrale, à les approcher par l'étude de la répartition de l'énergie dans le spectre.

### 7.1.2 Comment décrire le spectre ?

Nous allons dans un premier temps détailler les méthodes d'estimation de l'amplitude du formant du chanteur, avant de voir d'autres méthodes permettant d'approcher plus largement la répartition de l'énergie.

**Mesurer l'amplitude du formant du chanteur**

La mesure de l'amplitude du formant du chanteur a été approchée de diverses manières. Sundberg (2001) mesure la différence d'amplitude du troisième formant par rapport à celle du premier, et compare cette différence à ce qu'elle serait dans le cadre de la parole. Pour cela, il prédit l'amplitude du troisième formant, connaissant les caractéristiques des deux premiers d'après les équations décrites par Fant (1970). Cette méthode permet de décrire l'émergence du formant du chanteur (ou plus précisément du troisième formant) par rapport à ce qu'il serait en parole. Nous n'avons pas choisi cette méthode car elle nécessite une identification précise des fréquences des trois premiers formants.

Une autre approche consiste à mesurer le niveau maximal du formant du chanteur. De façon générale, ce niveau dépend de l'intensité totale. Pour remédier à cet inconvénient et exprimer l'«émergence» du formant du chanteur, plusieurs auteurs ont proposé de calculer le niveau maximal du formant du chanteur, et de le soustraire au niveau maximal des premières harmoniques. C'est ce qu'ont fait par exemple Schutte et Miller (1984, 1985) en parlant d'équilibre des résonances (*resonance balance*). Omori *et al.* (1996) ont proposé d'étudier la différence de maximum spectral entre 2 - 4 kHz et 0 - 2 kHz, et l'ont appelée Singing Power Ratio (SPR). Ce paramètre a ensuite été utilisé par plusieurs auteurs (Pillot, 2004; Amir *et al.*, 2005; Watts *et al.*, 2006). Il est habituellement calculé à partir de spectres à long terme (LTAS). Effectuer ce type de spectres sur des productions à hauteur, intensité et voyelle fixées s'avère difficile. La fiabilité de la mesure est en effet mise en doute, par exemple quand un alignement d'un harmonique sur un formant augmente considérablement l'énergie de cet harmonique sans pour autant modifier beaucoup l'énergie globale du formant du chanteur. Nous avons choisi de travailler à partir de balances spectrales.

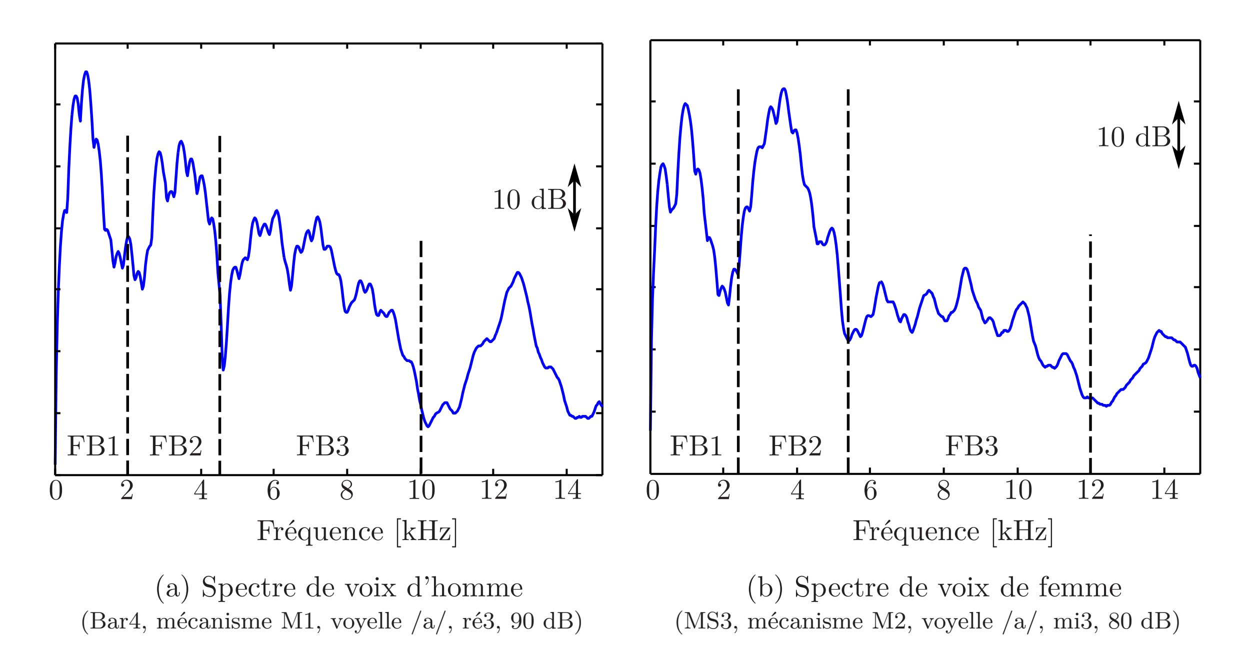
**Mesures de balances spectrales**

D'autres méthodes ont encore été utilisées pour estimer l'amplitude du formant du chanteur. Elles sont basées sur l'estimation de l'énergie dans une bande de fréquence déterminée. Un résumé (non exhaustif) des utilisations de ce type de méthode est présenté tableau 7.1. Nous voyons que ces méthodes consistent à comparer soit l'énergie dans deux bandes fréquentielles (les auteurs parlent alors souvent de balance spectrale), soit de comparer l'énergie dans une bande à l'énergie totale. Les largeurs de bandes utilisées varient en fonction des auteurs, souvent la borne inférieure de la bande étudiée est 2 kHz, et la borne supérieure est 4, 5 ou 6 kHz. Il est aussi intéressant de constater que les auteurs leur attribuent différentes qualités: dans certains cas, le paramètre en question doit approcher la pente spectrale, d'autres fois il ne décrit que le

| Études | Bandes spectrales utilisées (en kHz) | nom du paramètre | donnée visée |
|---|---|---|---|
| Frøkjaer-Jensen et Prytz (1976) | >1 / 0-1 | $\alpha$ | qualité vocale |
| Pabon et Plomp (1988) | 1.5-5 / 0-1.5 | | pente spectrale |
| Collyer *et al.* (2007, 2009)<br>Ferguson *et al.* (2010) | 2-4 / 0-2 | Spectral Balance<br>Energy Ratio | pente spectrale |
| Seidner *et al.* (1983, 1995) | 2-5 / SPL | | qualité vocale |
| Seidner *et al.* (1985) | 2-4 / SPL | | qualité vocale |
| Ternström *et al.* (2006) | 2-6 / 0.1-1 | Spectral Balance | |
| Schultz-Coulon *et al.* (1979a,b) | 2.5-3 / SPL | | formant du chanteur |
| Bloothooft et Plomp (1984, 1985, 1986a,b) | niveau de tiers d'octave / SPL | | |

TAB. 7.1 – *Définitions des différents paramètres utilisés pour décrire la répartition de l'énergie dans le spectre (la liste n'est pas exhaustive).*

formant du chanteur. En outre dans plusieurs cas, les auteurs l'utilisent comme un estimateur de la qualité vocale.




(a) Spectre de voix d'homme
(Bar4, mécanisme M1, voyelle /a/, ré3, 90 dB)

(b) Spectre de voix de femme
(MS3, mécanisme M2, voyelle /a/, mi3, 80 dB)

FIG. 7.1 – *Exemples d'enveloppes spectrales produites par un homme (figure (a)) et une femme (figure (b)), pour lesquelles nous avons fait apparaitre le découpage fréquentiel adopté.*

**Méthode adoptée**

Nous avons choisi de décrire le spectre par trois bandes fréquentielles comme indiqué figure 7.1: pour les hommes, la première bande (nommée FB1 pour *Frequency Band 1*) va de 0 à 2 kHz, la deuxième (FB2) de 2 à 4.5 kHz, et la troisième (FB3) de 4.5 à 10 kHz. Pour les femmes, FB1 va de 0 à 2.4 kHz, FB2 de 2.4 à 5.4 kHz, FB3 de 5.4 à 12 kHz. Ces bornes fréquentielles ont été obtenues en multipliant celles des hommes par 1.2, ce qui nous permet de prendre en compte les différences morphologiques et acoustiques entre les hommes et les femmes (Fant, 1966). Ainsi, FB1 comprend essentiellement des informations relatives aux articulations vocaliques (elle comprend les fréquences des deux premiers formants), et FB2 comprend le formant du

chanteur lorsqu'il est présent dans le spectre. Nous avons choisi de fixer la limite supérieure de FB2 à 4.5 kHz pour les hommes et à 5.4 kHz pour les femmes pour que cette limite coïncide avec le minimum spectral attribué aux cavités des sinus piriformes (Dang et Honda, 1997). Enfin, FB3 correspond aux hautes fréquences, situées au delà de ce qui est habituellement modélisé, et contient également un renforcement spectral (appelé parfois «formant à l'octave», cf. Pillot, 2004).

Pour cela, nous avons appliqué aux signaux vocaux préaccentués un banc de filtres (un passe-bas et deux passe-bande, de Butterworth, correspondant aux trois bandes décrites), et nous avons mesuré le niveau de chacune d'elles.

Nous savons qu'une variation d'intensité globale s'accompagne également d'une variation de répartition de l'énergie dans la globalité du spectre. Ce phénomène est commun à l'ensemble des instruments de musiques (Castellengo, 2002), et est une des raisons pour lesquelles un pianissimo diffère d'un fortissimo, à la fois par une différence de niveau et de timbre. Nordenberg et Sundberg (2004) ont montré que la variation d'énergie était plus importante (en dB) au niveau des fréquences aigües que des graves, c'est-à-dire que le niveau de la bande fréquentielle du formant du chanteur change plus vite que celui du son global. Pour prendre en compte ce phénomène, nous avons choisi d'étudier le rapport d'énergie de chaque bande par le niveau global. Dans la suite de la thèse, ce rapport sera appelé ER (pour *Energy Ratio*).

$$ER(FB_i) = 10 * log\left(\frac{E(FB_i)}{E(total)}\right) \text{ , i = 1, 2, 3.}$$

ER(FB1) ne sera pas étudié dans ce manuscrit. Il est très proche de l'énergie totale et n'apporte donc pas beaucoup d'information. Il résulte de cette remarque qu'il est très similaire d'étudier l'énergie d'une bande fréquentielle relativement à l'énergie totale ou relativement à l'énergie dans FB1. Par conséquent les études de balances spectrales sont très proches de ER(FB2). Le SPR contient également une information similaire, bien que le mode de calcul soit un peu plus éloigné. Enfin, FB3 est beaucoup plus faible, contient extrêmement peu d'énergie physique, bien que les harmoniques présentes dans cette bande puissent avoir une influence sur le timbre global. Nous allons maintenant étudier ER(FB2) et ER(FB3) en fonction de la hauteur, de l'intensité, du mécanisme laryngé et de la voyelle.

**Note terminologique**

Nous avons défini le formant du chanteur comme un renforcement de l'énergie dans le spectre autour de 3 kHz. L'expression «formant du chanteur» est très contestable pour plusieurs raisons:

- il ne s'agit pas d'un formant mais, au niveau acoustique, du rapprochement des formants 3, 4 et éventuellement 5. La terminologie anglophone proposée par Sundberg a d'ailleurs évoluée en ce sens, de «singing formant» (Sundberg, 1974) vers «singer's formant» (Sundberg, 1995; Sundberg et Högset, 2001), pour aboutir à «singer's formant cluster» (Sundberg, 2003) ou «singer's resonance cluster» (Lamarche, 2009).
- comme nous l'avons mentionné, ce renforcement n'est pas propre au chant, il est observé dans différents types de voix projetées (acteurs, orateurs).
- pour un chanteur donné, il désigne un renforcement fréquentiel et non une bande de fréquences. Il en résulte que le formant du chanteur peut être présent ou non au niveau d'un spectre vocal. Néanmoins la limite précise à partir de laquelle nous pouvons parler de formant du chanteur n'est pas définie précisément, ce qui laisse un certain flou pour parler du formant du chanteur si le renforcement est faible.

Nous n'avons pas l'ambition de préciser la définition de ce que nous appelons formant du chanteur. Dans notre étude, nous parlerons parfois de ER(FB2), de rapport d'énergie de FB2 ou de rapport d'énergie du formant du chanteur. Nous assimilerons ces expressions dans notre étude, tout en gardant en mémoire que le formant du chanteur désigne un renforcement spectral et non une bande de fréquence.

## 7.2 Étude de l'énergie dans FB2

### 7.2.1 État de l'art

Nous allons présenter l'état des connaissances quant aux influences de l'intensité, du mécanisme laryngé, de la voyelle sur le niveau du formant du chanteur.

**Le formant du chanteur et l'intensité**

Le niveau du formant du chanteur est lié à l'énergie totale. Schultz-Coulon *et al.* (1979b) enregistré 24 chanteurs professionnels (13 hommes, 11 femmes) chantant sur la voyelle /a/ des productions à 65, 75 et 85 dB (mesurées à un mètre de la bouche des chanteurs, mais le son a été enregistré à 30 cm), sur do2, sol2 et do3 pour les hommes, et une octave plus haut pour les femmes. Ils montrent que l'énergie de la bande 2.5-3 kHz relativement à l'énergie totale augmente avec le SPL.

Cleveland et Sundberg (1983, 1993) ont mesuré l'énergie du formant du chanteur chez trois hommes, et ont également constaté que l'énergie du formant du chanteur augmente plus vite que le SPL.

Bloothooft et Plomp (1984, 1985, 1986a,b) ont enregistré une vaste base de données dans le but d'effectuer une analyse spectrale des voyelles chantées, et ont notamment étudié le formant du chanteur. Ils ont enregistré 14 chanteurs (7 hommes et 7 femmes) effectuant des productions sur neuf voyelles, six fréquences fondamentales (de 98 à 880 Hz), et neuf «modes vocaux» (*modes of singing*), incluant fortissimo et pianissimo. Ils ont entre autres effectué des analyses d'énergie par tiers d'octave, et ont étudié le niveau de la bande centrée sur 2.5 ou 3.16 kHz, relativement au niveau total. Ils constatent aussi que ce dernier paramètre augmente avec le SPL, et diminue avec la fréquence, quelle que soit la voyelle ou la tessiture du chanteur.

Sundberg (2001) a étudié, chez deux barytons, le niveau au dessus de 2 kHz relativement au SPL. Il a constaté, pour trois niveaux de fréquence et deux voyelles (/a/ et /i/), une augmentation de 16.3 dB pour 10 dB-SPL.

Ferguson *et al.* (2010) ont mesuré toutes les 10 ms la différence d'énergie des bandes 2-4 kHz et 0-2 kHz. Le paramètre obtenu, qu'ils ont appelé STER (Short Term Energy Ratio), est étudié en fonction du SPL, ainsi que de l'entrainement vocal. Neuf hommes de différents niveaux vocaux ont été enregistrés, chantant le même air. Outre une corrélation positive entre le STER et l'intensité, ils constatent que, chez les sujets les plus entrainés, il existe un seuil de «saturation» de SPL, au delà duquel le STER cesse d'augmenter, et parfois même, diminue.

En étudiant des attributs spectraux de la parole en environnement bruyant, Ternström *et al.* (2006) ont également observé et décrit cette saturation. Le paramètre étudié est appelé balance spectrale (SB), et est défini comme l'énergie de 2 à 6 kHz relativement à l'énergie de 100 à 1000 Hz. Cette saturation est observée chez tous les sujets (hommes et femmes), 6 à 8 dB en dessous du niveau maximal possible.

Collyer *et al.* (2009) ont également étudié les profils de SB:SPL (la balance spectrale étant cette fois définie le STER de Ferguson) en fonction de la hauteur. Cinq chanteuses professionnelles ont été enregistrées effectuant des *messa di voce* produits entre mi2 (165 Hz) et mi5 (1319 Hz), sur la voyelle /a/ uniquement. Un exemple représentatif de l'ensemble de la base de données est présenté figure 7.2. Les auteurs ont observé des profils SB:SPL non linéaires, néanmoins la saturation de la balance spectrale n'a été observée que dans 3 productions sur 318. Selon les auteurs, il serait préférable, pour les chanteurs, de rester en dessous du seuil de saturation.

**Formant du chanteur et voyelles**

Les voyelles sont fortement liées aux fréquences des deux premiers formants situés dans FB1. Elles peuvent également avoir une influence sur l'énergie dans FB2.

Seidner *et al.* (1983) ont étudié l'énergie dans la bande 2 - 5 kHz relativement à l'intensité totale, pour les voyelles /a/, /i/ et /u/, chez cinq chanteurs (une basse, un baryton, un ténor, une alto et une soprano), à forte intensité. Leur étude ne permet pas d'établir de tendance générale quant à l'influence de la voyelle. Seidner *et al.* (1985) ont ensuite effectué une étude

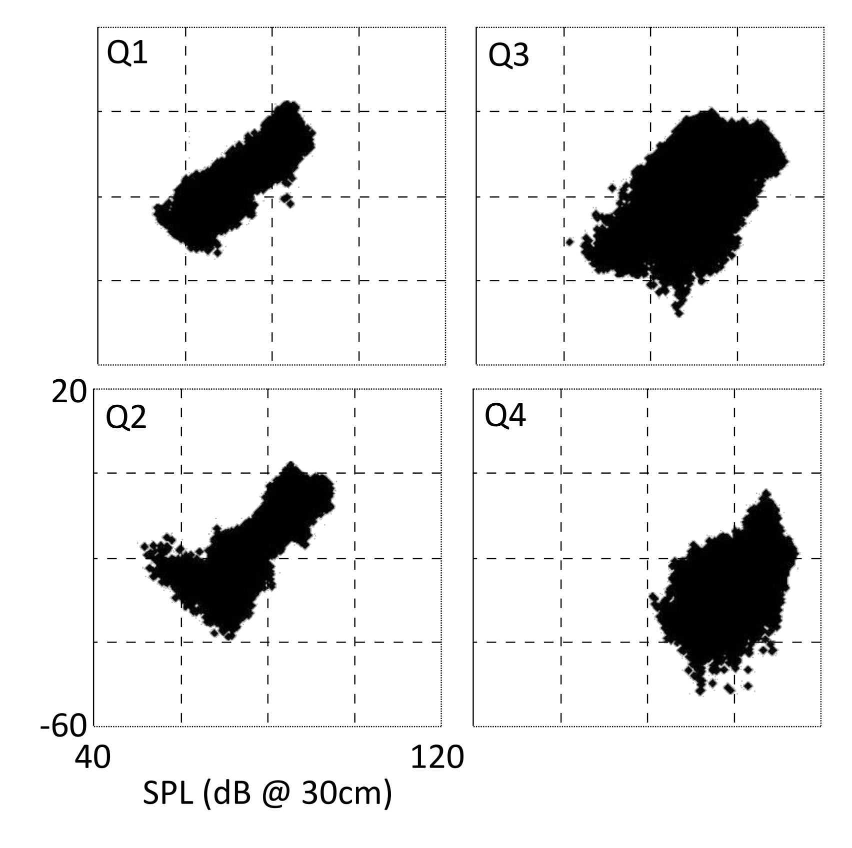



Fig. 7.2 – *Profils de SB donnés par Collyer* et al. *(2009), obtenus à partir de messa di voce effectuées par une soprano. Chacun des quatre graphique correspond aux données obtenues sur un quart de la tessiture totale de la chanteuse (Q1 correspond à la partie la plus grave, Q4 à la partie la plus aigüe).*

plus large, avec 90 sujets répartis équitablement dans trois catégories (chanteurs, étudiants en chant et non-chanteurs), et ont mesuré l'intensité du formant de la bande 2 - 4 kHz. Ils observent que le niveau du formant du chanteur prend des valeurs très proches sur les voyelles /i/ et /a/, mais est plus faible sur le /u/. Ce résultat est globalement partagé par Bloothooft et Plomp (1985). Pillot (2004) a observé que le SPR est plus faible sur /u/ que sur /a/, puis que sur /i/.

**Formant du chanteur et mécanismes laryngés**

Très peu d'études portent sur l'énergie du formant du chanteur relativement au mécanisme laryngé. Les études effectuées se heurtent, selon nous, aux écueils suivants :

– les auteurs ne parlent pas de mécanismes laryngés mais de registres [1] ;
– les auteurs ont effectué la comparaison de l'amplitude du formant du chanteur entre les registres modal et falsetto sur des voix d'hommes uniquement. En conséquence ils étudient une voix qui est entrainée à chanter en mécanisme M1 et pas en M2, alors que le formant du chanteur est fortement dépendant de la technique vocale.

Schutte et Miller (1984) ont constaté que le SPR est de 4 dB plus faible en registre falsetto que dans les autres registres utilisés en concert par le ténor enregistré (Les auteurs ont plus précisément étudié le paramètre de *resonance balance*, correspondant à l'opposé du SPR). La mesure a été effectuée à un niveau confortable, mais il n'est pas précisé si ce niveau est le même pour les différents registres. Bloothooft et Plomp (1985, 1986a) ont aussi comparé des productions de registres modal et falsetto masculines, effectuées sur un sol3 (392 Hz). Ils constatent que le niveau du formant du chanteur (relativement au SPL) est 5 dB plus faible en falsetto que dans le registre modal, alors que le SPL est 9 dB plus faible.

1. ce qui par ailleurs présente un intérêt certain, mais distinct du nôtre

### 7.2.2 Résultats

Notre étude de ER(FB2) a pour but de répondre aux questions suivantes :

- pourquoi Collyer *et al.* (2009) ont-ils observés ce phénomène de saturation et pas Ferguson *et al.* (2010), alors que ces deux études portent sur le chant lyrique ? La saturation spectrale observée est-elle donc spécifique aux hommes dans le chant ? Est-elle limitée à un mécanisme laryngé ?
- quelle est la dépendance de ER(FB2) avec le mécanisme laryngé ? Observe-t-on des niveaux similaires de ER(FB2) lorsque l'on les compare à même hauteur et intensité ? Quel est l'influence de l'entrainement vocal ?
- l'incidence de la voyelle est-elle la même en M1 et en M2? Observe-t-on les mêmes résultats que ceux énoncés dans la littérature en comparant les productions à hauteur et intensité fixées ?

#### Corrélation entre ER(FB2) et l'intensité

Les figures 7.3 et 7.4 présentent deux profils de ER(FB2) en fonction du SPL, auxquels nous avons adjoint les représentations spectrographiques des deux productions, les courbes de SPL et d'amplitude de l'EGG et fonction du temps.

Le profil ER(FB2):SPL de la figure 7.3 présente deux parties distinctes : en dessous de 87 dB (repères temporels 2 à 3), la relation entre ER(FB2) et le SPL est linéaire et ER(FB2) augmente avec l'intensité, c'est à dire que l'énergie de la bande de fréquences du formant du chanteur augmente plus vite que l'intensité. Au dessus de 87 dB (des repères 1 à 2) il sature à un niveau proche de 0 dB, c'est à dire que l'énergie de FB2 augmente aussi vite que le SPL. Ce type de profil correspond à une saturation de ER(FB2), et est similaire à ceux observés par Ferguson *et al.* (2010) ou Ternström *et al.* (2006).

Le profil ER(FB2):SPL de la figure 7.4 diffère de l'exemple précédent : dans la zone de non-accolement (repères 2 à 4), ER(FB2) diminue linéairement avec l'intensité, puis augmente. Dans la partie avec accolement (repères 1 à 2), il est constant à -10 dB. Ce profil est très similaire à certains présentés par Collyer *et al.* (2009), également obtenus à partir de voix de femmes.

Pour ces deux exemples donc, modéliser la relation entre ER(FB2) et l'intensité linéairement ne semble pas pertinent. Nous n'utiliserons donc pas le coefficient de corrélation comme dans le chapitre 6.

Nous avons présenté figure 7.5 les graphiques représentant les zones explorées par six chanteurs dans le plan ER(FB2)-SPL. Les contours présentés sont comparables à ceux des nuages de points présentés figure 7.2. Parmi ces chanteurs, S2 est amateur de niveau avancé, et MS2 est chanteuse de gospel, les quatre autres chanteurs sont des professionnels.

T1 est le chanteur qui a le plus de dynamique (SPL) pour un ER(FB2) pratiquement nul. Cette tendance se retrouve, à un moindre niveau, chez MS2. Par exemple, elle ne se retrouve pas chez CT1 pour qui, même en mécanisme M1, ER(FB2) semble augmenter plus progressivement avec le SPL. Cette différence est intéressante à noter, sachant que ces deux chanteurs utilisent leur mécanisme M1 de façon très différente : alors que T1 cherche à l'étendre dans l'aigu, et peut être à garder un timbre de voix faisant clairement penser à du mécanisme M1, CT1 au contraire tend plutôt à ne pas l'étendre dans l'aigu et à trouver un timbre se rapprochant de celui du mécanisme M2. Il pourrait y avoir une corrélation entre ER(FB2) et le type de technique vocale. Chez B3 nous observons un phénomène tout à fait particulier : à très haut SPL, ER(FB2) diminue, c'est à dire que le niveau du formant du chanteur augmente moins vite que l'intensité. Si nous observons son phonétogramme complet, nous constatons que cela est dû au fait que B3 atteint les plus fortes intensités sur le do3 et au dessus, alors qu'il atteint son maximum de ER(FB2) en dessous de do3 (dans une tessiture peut-être plus couramment utilisée), à des intensités (SPL) effectivement plus faibles.

La comparaison des résultats en M1 et en M2 montre que pour la plupart des chanteurs présentés ici, des niveaux équivalents de ER(FB2) sont atteignables en M1 et en M2 à intensité

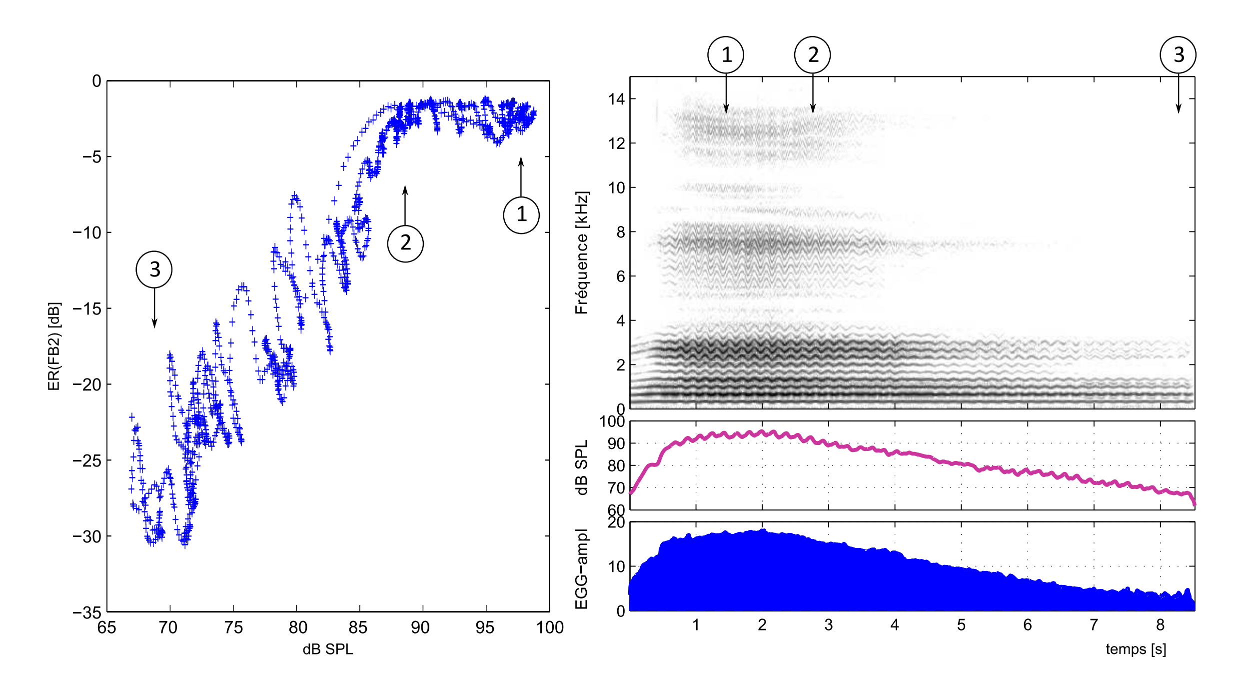



Fig. 7.3 – *Exemple de profil ER(FB2):SPL produit par T1 en mécanisme M1, auquel nous avons associé le spectrogramme de la production, la courbe de SPL et l'amplitude du signal EGG. Voyelle : /a/, note : ré3 (exemple sonore 7).*

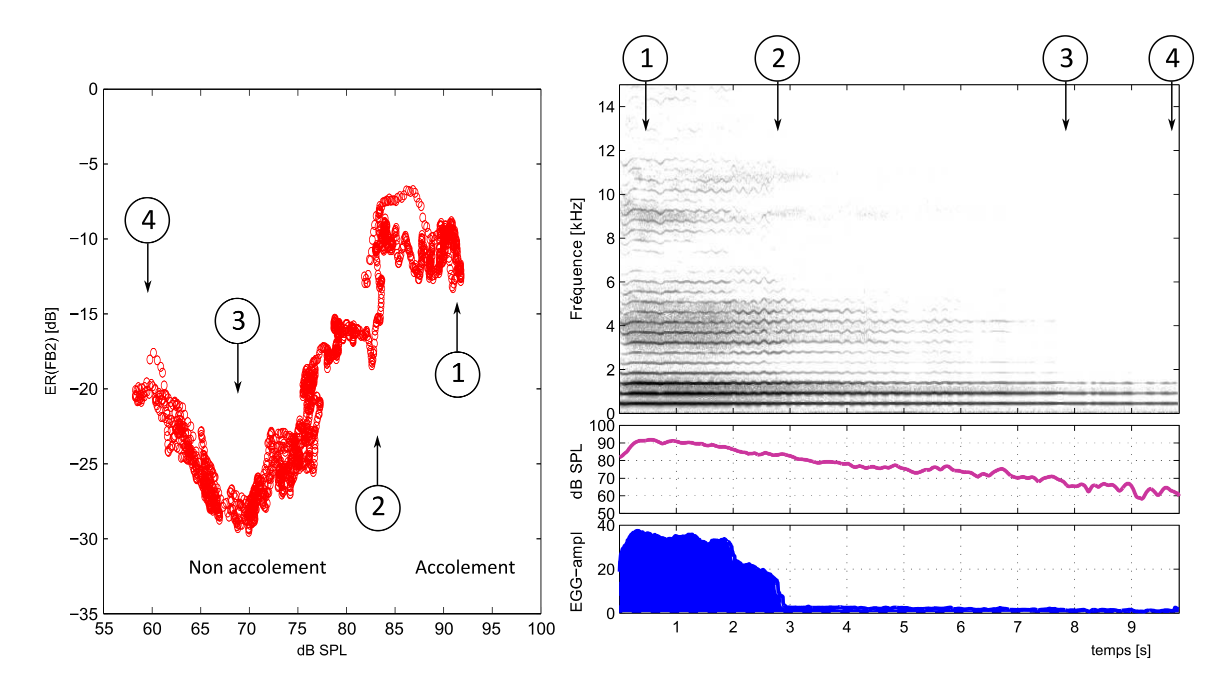



Fig. 7.4 – *Exemple de profil ER(FB2):SPL produit par S3 en mécanisme M2, auquel nous avons associé le spectrogramme de la production, la courbe de SPL et l'amplitude du signal EGG. Voyelle : /a/, note : sib3 (exemple sonore 8).*

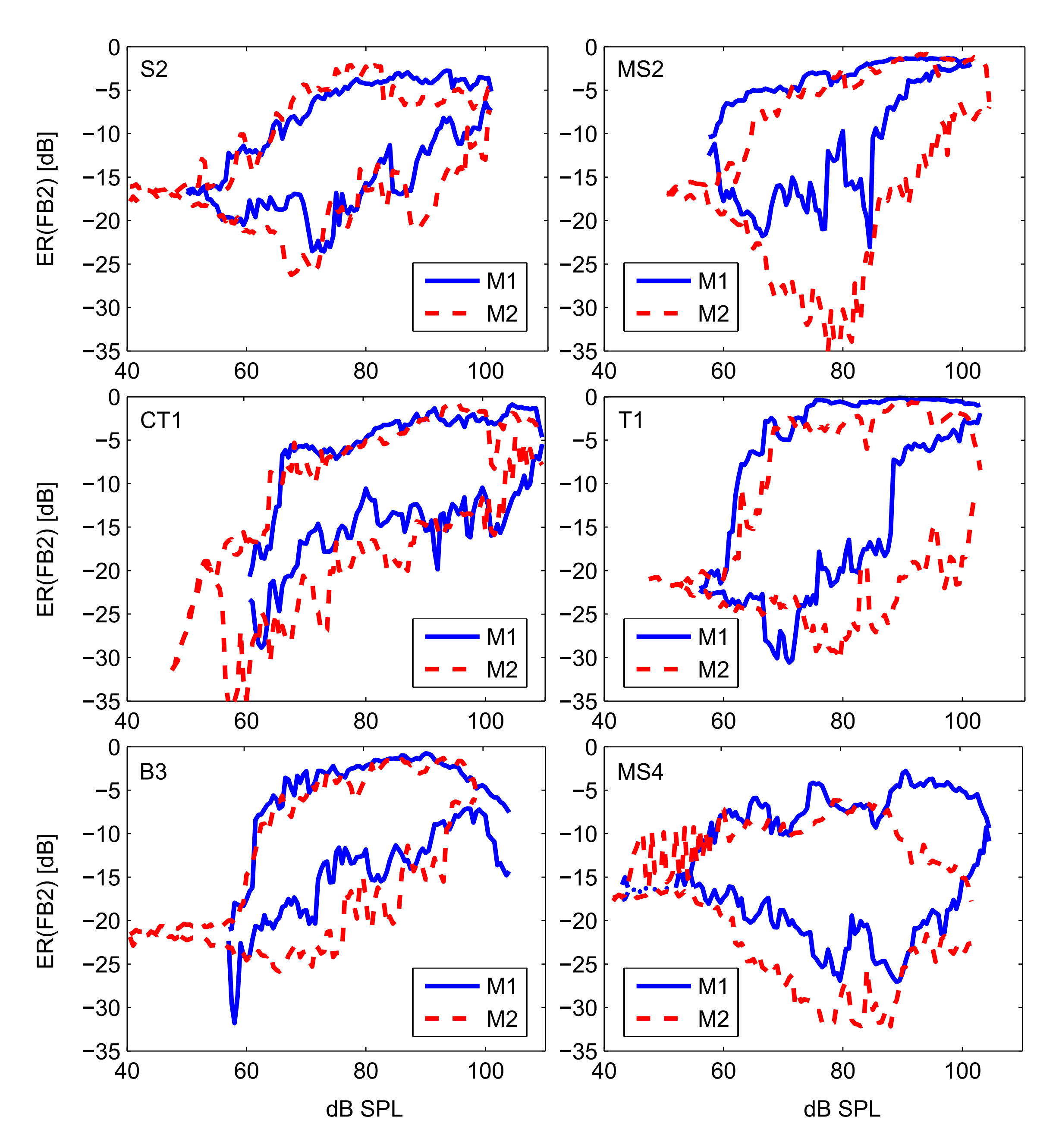



FIG. 7.5 – *Exemples de zones utilisées par les chanteurs dans le domaine ER(FB2) - SPL, pour six chanteurs, en M1 et en M2, et sur la voyelle /a/.*

donnée (mais pas intensité et hauteur). Seul T1 n'atteint pas ses plus hautes valeurs de ER(FB2) en M2, ainsi que MS4 à plus de 90 dB.

Nous avons effectué une observation de profils ER(FB2):SPL, à différentes hauteurs, sur l'ensemble de la base de données. Il en ressort que le type de profil présenté figure 7.3 (exemple de T1) a été observé, sur la voyelle /a/, en mécanisme M1, chez Bar1, Bar2, Bar4, B2 (surtout dans le grave), B3, T1 et T2, mais pas en mécanisme M2. Nous pouvons remarquer que ces six chanteurs utilisent le mécanisme M1 en représentation et pas le M2.

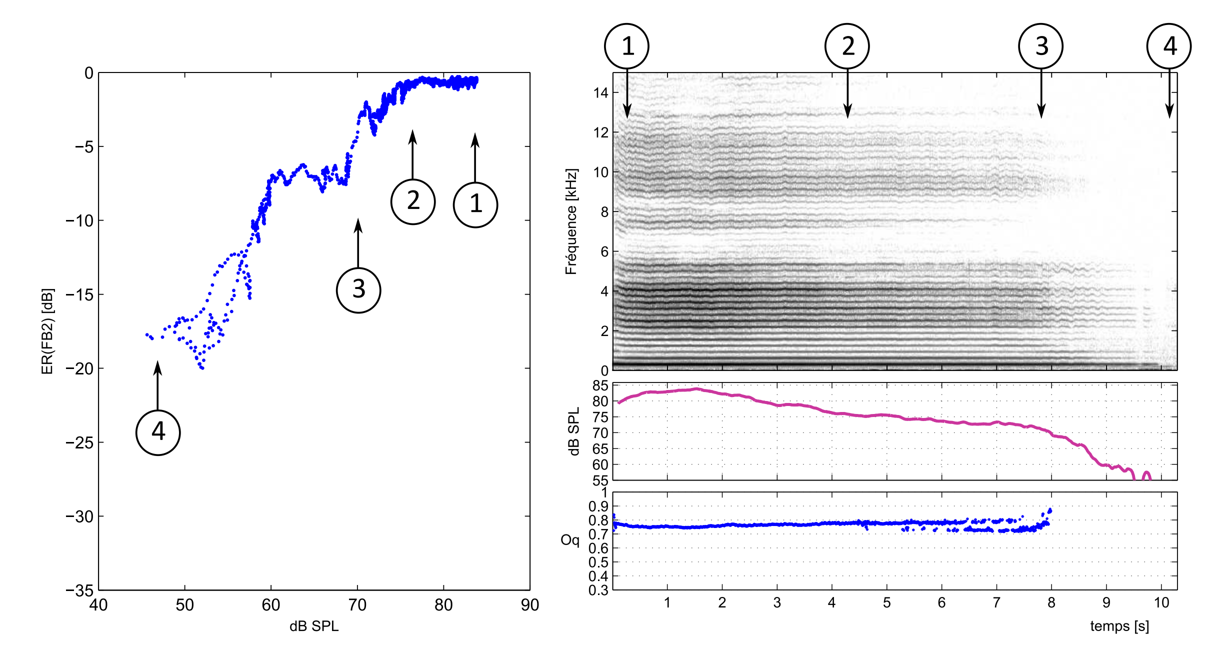



FIG. 7.6 – *Production d'un decrescendo en mécanisme M2 sur /i/, présentant la saturation de ER(FB2). Chanteur : MS3, note : mi3 (Exemple sonore 9).*

Sur la voyelle /i/, nous avons observé ce type de profil chez presque tous les chanteurs en mécanisme M1. Seuls CT2, MS2, S1 et S4 (soit quatre chanteurs amateurs) ne manifestent pas cette tendance en M1, soit dans le mécanisme peu ou pas utilisé en représentation. B1, B2, B3 et Bar3 ne l'ont que dans la partie grave de la tessiture étudiée. Enfin, T4, CT1, MS3, MS4, S3 et S2 ont aussi ce type de relation ER(FB2)-SPL en mécanisme M2. Parmi ces chanteurs, seul T4 ne chante habituellement pas en mécanisme M2, et les autres sont tous professionnels, ou de niveau vocal très avancé. Un exemple de saturation observé en mécanisme M2, sur la voyelle /i/, est présenté figure 7.6.

Pour conclure, nous retiendrons que les profils ER(FB2):SPL varient beaucoup en fonction de l'entrainement vocal et de la voyelle. Nous observons globalement une augmentation de ER(FB2) avec l'intensité. Les chanteurs de mécanisme M1 développent un phénomène de saturation de ER(FB2) dans la tessiture qu'ils utilisent préférentiellement sur la voyelle /a/. L'ensemble des chanteurs entrainés le développent sur la voyelle /i/ en M1, et les chanteurs avancés vocalement qui utilisent le mécanisme M2 le développent également en M2 (dans la tessiture étudiée). Dans les zones de non accolement des cordes vocales, la relation entre ER(FB2) et le SPL est complexe. Elle peut soit correspondre à une pente négative (c'est à dire que l'énergie du formant du chanteur n'augmente pas alors que le SPL augmente), soit en une pente positive.

### Influence du mécanisme laryngé sur ER(FB2)

Nous pouvons voir sur la figure 7.5 que les chanteurs étudiés peuvent atteindre des valeurs maximales similaires de ER(FB2) en M1 et en M2 (parfois pas sur toute la dynamique). Nous allons maintenant comparer ces ER(FB2) à hauteur et intensité fixées. Les résultats généraux sont présentés figure 7.7.

Cette figure détaille les résultats sur les trois voyelles. Sur les trois voyelles confondues, nous constatons d'abord une certaine variabilité entre les sujets. Dans la plupart des cas, les valeurs

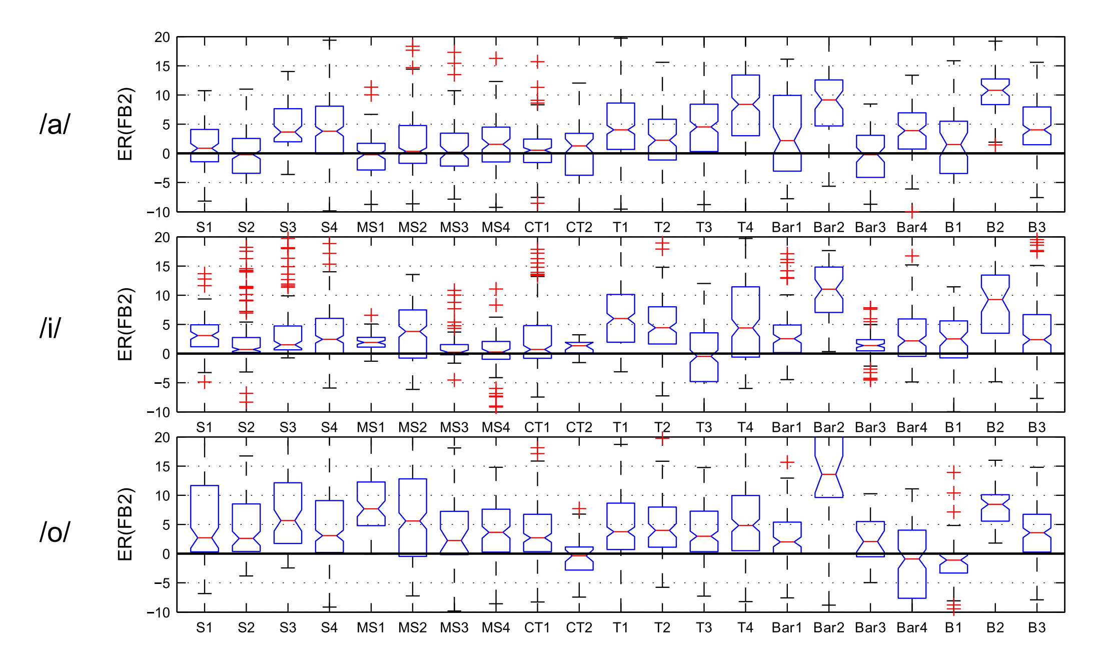



Fig. 7.7 – *Statistiques de la différence de ER(FB2) mesurée entre les productions de mécanisme M1 et celles de mécanisme M2 à hauteur et intensité fixées, détaillées pour chaque chanteur et chaque voyelle.*

médianes sont positives, ce qui signifie que l'énergie du formant du chanteur a tendance à être plus importante en mécanisme M1 qu'en M2.

Sur la voyelle /a/, nous constatons que les valeurs médianes varient entre 0 et 12 dB environ. Nous notons que les chanteurs de mécanisme M2 (donc les femmes et les contre-ténors) présentent tous des valeurs proches de zéro, alors que celles des chanteurs de M1 sont plus dispersées. S2 et MS1 ont même une valeur médiane négative. Nous retrouvons une tendance similaire sur la voyelle /i/. Sur la voyelle /o/, chez les chanteurs de M2, les intervalles interquartiles sont plus grands que sur les autres voyelles, et du même ordre de grandeur que pour les chanteurs de M1, et les valeurs médianes sont plus élevées que sur les autres voyelles.

Sur les voyelles /a/ et /i/, il semble que les chanteurs de M2 aient une stratégie d'équilibrage de l'énergie du formant du chanteur en M1 et M2. Nous illustrons ce phénomène en comparant deux enveloppes spectrales produites par MS3 lors de l'enregistrement de son phonétogramme. À hauteur et intensité fixées, le niveau du formant du chanteur est bien équivalent en mécanisme M1 et en M2.

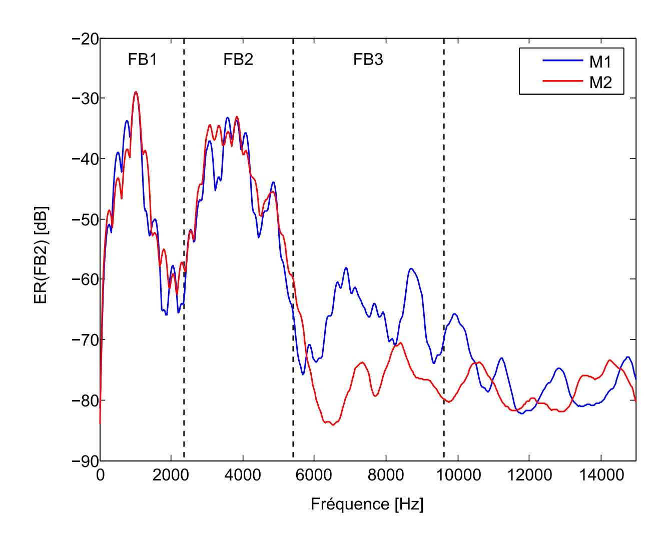



Fig. 7.8 – *Enveloppes spectrales de deux productions effectuées en mécanisme M1 et en mécanisme M2 par MS3 sur /a/, do3 et 85 dB.*

### Influence de la voyelle sur ER(FB2)

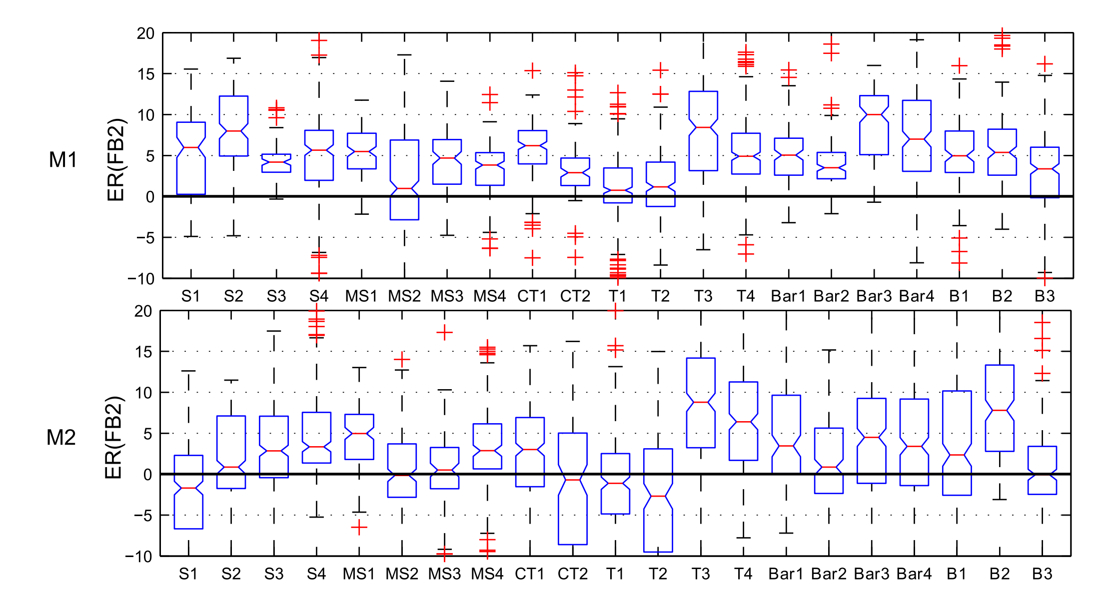



Fig. 7.9 – *Différence de ER(FB2) mesuré entre les voyelles /i/ et /a/ (ER(FB2,/i/) − ER(FB2,/a/)), à hauteur et intensité fixées, pour chaque chanteur. Valeurs médianes (traits rouges), quartiles (boîtes bleues), valeurs supérieures et inférieures adjacentes (moustaches noires), et points «aberrants» (donc situés hors des limites fixées par les valeurs supérieures et inférieures adjacentes) (croix rouges).*

Les figures 7.9 et 7.10 présentent les statistiques des différences de ER(FB2) observées entre deux voyelles (respectivement /a/ et /i/, ainsi que /o/ et /a/) à hauteur et intensité fixes, en M1 et en M2. Les valeurs médianes de différences observées entre /a/ et /i/ vont de 0 à 10 dB en M1, elles prennent des valeurs négatives pour trois chanteurs en M2. Entre /a/ et /o/, les différences vont de -3 à 8 dB. Nous nous contenterons de noter que d'une façon générale, ER(FB2) est plus grand sur /i/ que sur /a/ et plus grand sur /a/ que sur /o/.

## 7.2.3 Discussion

### ER(FB2) et intensité

Comme nous l'avons vu (partie 7.2.1), de nombreuses études ont déjà décrit l'augmentation de l'amplitude ou de l'énergie de la bande fréquentielle du formant du chanteur avec l'intensité. Notre étude permet d'établir que les phénomènes de saturation observées par Ternström *et al.* (2006) sur de la parole forcée (*loud speech over noise*) et par Ferguson *et al.* (2010) sont effectivement présents dans le chant, dans certaines conditions que nous pouvons maintenant préciser : la saturation est présente sur la voyelle /i/, en mécanisme M1 et en mécanisme M2 pour les chanteurs qui sont entrainés à chanter en mécanisme M2. Sur la voyelle /a/, elle est présente chez les chanteurs de mécanisme M1, essentiellement dans la tessiture qu'ils utilisent principalement. Nous présentons comme exemple les phonétogrammes de T1, en mécanisme M1 seulement, sur lesquels les zones correspondant à la saturation ont été foncées (figure 7.11).

Toujours sur la voyelle /a/ et en mécanisme M2, même les chanteurs entrainés ne présentent pas cette saturation. Nous pouvons donc en déduire que Collyer *et al.* (2009) n'ont pas observé de saturation dans le chant parce qu'ils se sont restreints à une situation ou effectivement, la saturation n'est pas présente (à savoir le mécanisme M2 de voix de femmes, plutôt aigu, et sur /a/). Globalement certains chanteurs développent cette saturation, qui n'est donc pas en contradiction avec l'entrainement vocal, dans d'autres tessitures et sur d'autres voyelles.

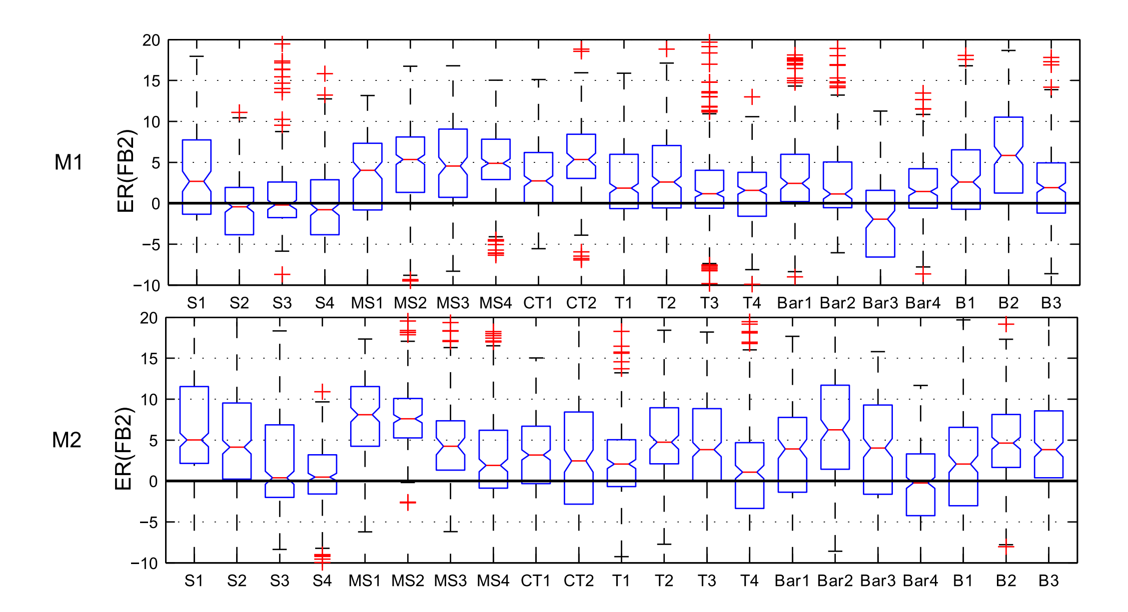



FIG. 7.10 – *Différence de ER(FB2) mesuré entre les voyelles /a/ et /o/ (ER(FB2,/a/) − ER(FB2,/o/)), à hauteur et intensité fixées, pour chaque chanteur. Valeurs médianes (traits rouges), quartiles (boîtes bleues), valeurs supérieures et inférieures adjacentes (moustaches noires), et points «aberrants» (donc situés hors des limites fixées par les valeurs supérieures et inférieures adjacentes) (croix rouges).*

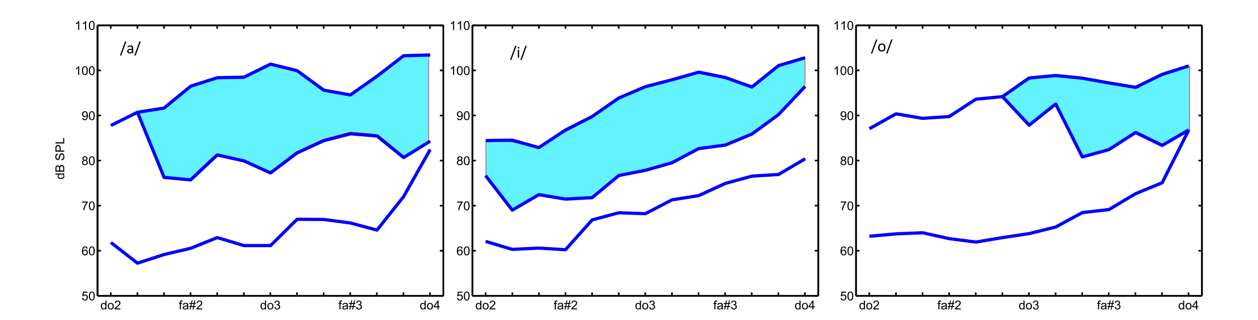



FIG. 7.11 – *Phonétogrammes de mécanisme M1 de T1, présentés séparément pour les trois voyelles. Les parties colorées correspondent aux zones où ER(FB2) est «saturé».*

**ER(FB2) et voyelle**

ER(FB2) est plus grand sur /i/ que sur /a/ et sur /a/ que sur /o/. Ce résultat est proche de ceux que nous avons décrits précédemment.

La théorie acoustique de la production vocale (Fant, 1970) permet de comprendre certains éléments relatifs à l'influence des voyelles sur l'amplitude du formant du chanteur. Plus le formant n se rapproche du formant n+1, plus le niveau du formant n+1 doit augmenter. Si l'on considère que le formant du chanteur est constitué des formants 3, 4 et (éventuellement) 5, alors le niveau du formant du chanteur est affecté par les fréquences des deux premiers formants. Sur /a/, la fréquence des deux premiers formants est plus élevée que sur /o/, ce qui, d'après la théorie de Fant, justifie une amplitude du formant du chanteur plus faible sur /o/ que sur /a/. Sur la voyelle /i/ le deuxième formant est très aigu (plus de 2 kHz), ce qui tend à augmenter encore le niveau du formant du chanteur. Néanmoins le premier formant est plus bas sur /i/ que sur /a/, ce qui pourrait peut-être expliquer que certains auteurs n'aient pas trouvé de différence d'amplitude du formant du chanteur entre /a/ et /i/.

Nous avons mis cette théorie à l'épreuve en simulant des filtres dont les fréquences des deux premiers formants sont variables, que nous avons convolué à la même source glottique. Chaque formant est modélisé par un filtre d'ordre 2. Le premier formant varie de 500 Hz à 900 Hz, le deuxième de 400 Hz à 2200 Hz, avec un facteur de qualité constant. Les formants 3, 4 et 5 sont fixes à 2500 Hz, 3000 Hz et 3500 Hz, et ont pour largeur de bande 150 Hz, 200 Hz et 250 Hz. Pour simuler la source, nous avons utilisé le modèle LF ($f_0$ = 220 Hz, E = 1, Oq = 0.5, $\alpha_m$ = 0.6, et TL = 1 dB). Le résultat de la simulation est présenté figure 7.12, dans le plan du triangle vocalique.

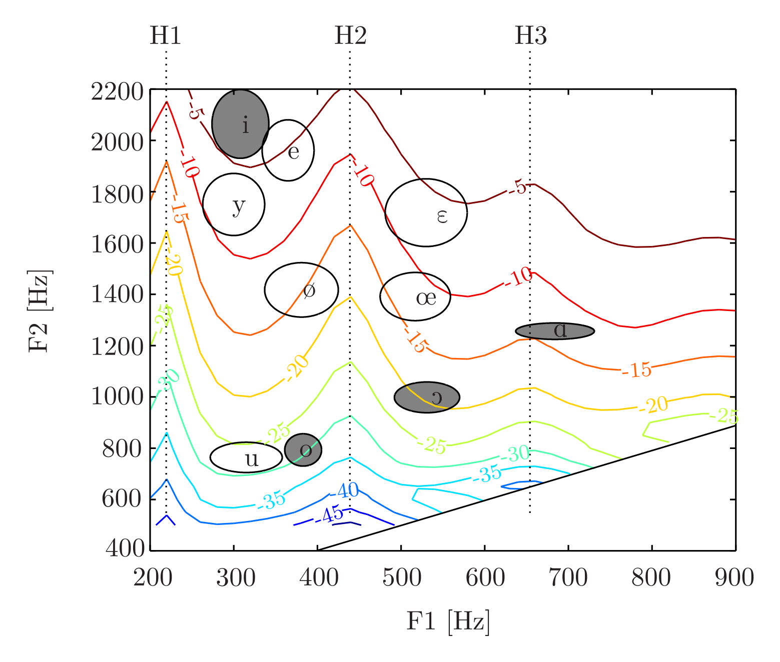



Fig. 7.12 – *Représentation, dans le plan F1-F2, des valeurs que prend ER(FB2) (exprimé en dB) simulé. Les régions des différentes voyelles sont obtenues à partir des valeurs médianes et des écarts types donnés par Calliope (1989). Ces valeurs théoriques ont été obtenues à partir de la parole masculine.*

Ce graphique permet de mettre en évidence que dans le cadre de l'acoustique linéaire classique, et avec une source dont les paramètres ont été réglés pour simuler du mécanisme M1, nous retrouvons les effets des deux premiers formants cités ci-dessus. D'une part, quand F1 s'approche d'un harmonique (situé ici à 440 Hz, 660 Hz et 880 Hz), le SPL augmente et ER(FB2) diminue. L'augmentation de F1 semble jouer un rôle moins important que la variation de F2. Selon cette simulation, ER(FB2) doit effectivement être maximal sur /i/, plus faible sur /a/ et encore plus faible sur /o/, ce qui sera d'autant plus marqué que le /o/ est fermé. Les différences obtenues entre voyelles sont néanmoins plus importantes que celles mesurées, il semble donc que

le modèle ne prenne pas en compte certains ajustements que les chanteurs effectuent, peut-être dans un souci d'homogénéité de timbre. Il est également possible que le troisième formant, dont la fréquence varie aussi un peu avec la voyelle, puisse expliquer une partie de l'écart entre la simulation et les mesures.

**ER(FB2) et mécanisme laryngé**

Nous avons constaté que la différence de formant du chanteur entre les productions de M1 et de M2 variait en fonction du sujet. Si certains chanteurs comme Bar2 ou B2 montrent des différences très importantes entre le M1 et le M2, les chanteurs de mécanisme M2 sont capables d'obtenir un formant du chanteur identique en M1 et en M2 à intensité et hauteur fixées, sur les voyelles /a/ et /i/. Nous avons donc montré que l'amplitude du formant du chanteur dépend de l'entrainement vocal, mais dans une dimension peu explorée dans la littérature : le type d'entrainement reçu par les différents chanteurs en fonction de leur tessiture. Les chanteurs n'utilisant que le mécanisme M1 ont globalement un formant du chanteur beaucoup plus important en M1 qu'en M2.

Les chanteurs de mécanisme M2 qui utilisent le mécanisme M1 pour émettre les notes graves de leur tessiture utilisent le registre de voix mixte pour préparer le changement de mécanisme ou pour imiter le timbre d'une production d'un mécanisme en chantant dans l'autre (cf. partie 1.2.3). Castellengo et collaborateurs (Castellengo *et al.*, 2007; Lamesch *et al.*, 2007) ont montré en comparant des spectres de productions de mécanisme M1, registre de poitrine et registre mixte, et de mécanisme M2, registre de mixte et registre de tête/falsetto, que les chanteurs utilisant la voix mixte étaient capables d'égaliser l'énergie de la zone FB2. Ils ont travaillé sur les voyelles /a/ et /i/. Nos résultats sont donc cohérents avec les leurs.

Il reste à comprendre pourquoi nous avons obtenu des différences d'énergie du formant du chanteur sur la voyelle /o/ chez tous les chanteurs. Nous avons présenté figure 7.13 à titre d'exemple les phonétogrammes de ER(FB2) obtenus chez MS4, en M1 et en M2, sur les trois voyelles. En mécanisme M2, sur /a/ et /i/, nous constatons que la chanteuse est capable de maintenir un haut niveau de ER(FB2) dans la partie grave (en dessous du do3), bien que ce niveau ne soit pas le même sur /a/ et sur /i/. Sur la voyelle /o/, nous constatons que ER(FB2) diminue environ de 7 dB quand MS4 passe du do3 au sib2, alors que nous n'observons pas cette diminution en mécanisme M1 sur la même voyelle. Nous avons observé les phonétogrammes de FB2 des autres chanteurs (ils sont présentés en annexe C).

Nous avons constaté que de nombreux chanteurs présentaient cette baisse soudaine de ER(FB2) dans le grave du mécanisme M2, parfois associé à une diminution de la limite supérieure. Les notes sur lesquelles nous observons ces variations ainsi que les variations en termes de ER(FB2) et SPL sont présentées dans le tableau 7.2. Nous constatons que nous observons ce phénomène chez 12 chanteurs. Tous ces chanteurs présentent ce même phénomène sur sib2-do3-ré3, à l'exception notable des deux contre-ténors pour lesquels cette transition s'effectue plus grave. Parmi les chanteurs de mécanisme M2, trois des quatre mezzo-sopranos ne présentent pas cette tendance.

Pour comprendre ces résultats, notons que le protocole d'enregistrement a certainement conduit les chanteurs (notamment ceux qui utilisent les deux mécanismes) à produire des sons de mécanisme M2 à des hauteurs sur lesquelles ils ne sont pas habitués à utiliser ce mécanisme. Il est probable qu'en représentation, les chanteurs présentant cette discontinuité passent en mécanisme M1 au moment de cette diminution de ER(FB2) en mécanisme M2. La zone de voix mixte (de mécanisme M2) pourrait donc être plus petite pour certains chanteurs. Il serait intéressant de comprendre si cette voyelle, dans le grave du mécanisme M2, induit une difficulté supplémentaire pour les chanteurs pour faire émerger le formant du chanteur.

M1 M2

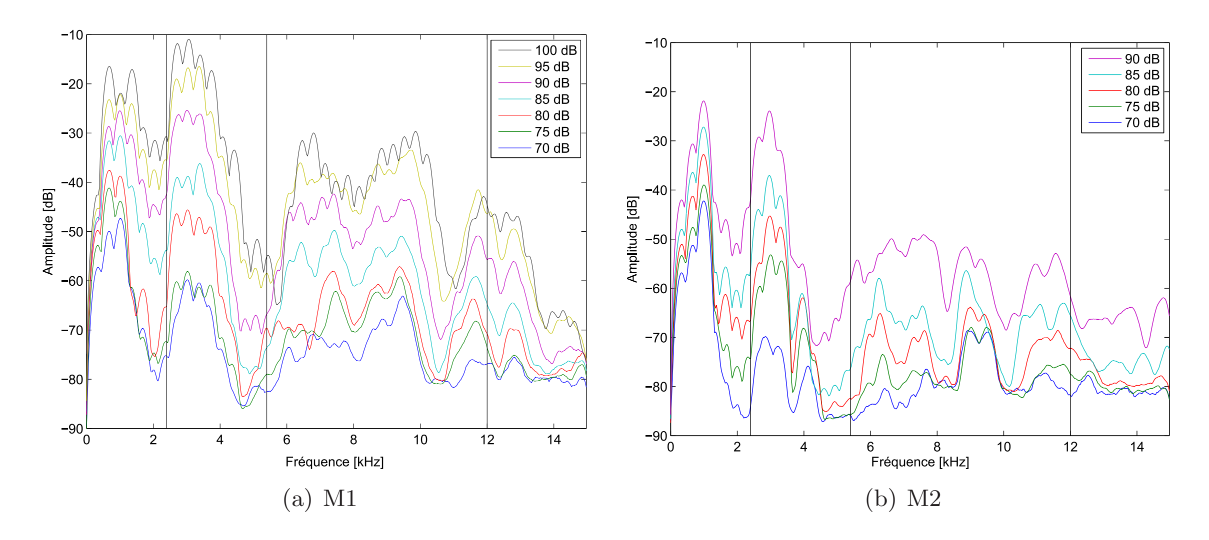
a

i

o

fa#1 do2 fa#2 do3 fa#3 do4 fa#4 do5

FIG. 7.13 – *Phonétogrammes de ER(FB2) de MS4, présentés séparément pour chaque mécanisme laryngé et pour chaque voyelle.*




(a) M1 (b) M2

FIG. 7.14 – *Spectres de decrescendos produits par MS4 sur /a/, mi3, en mécanisme M1 (a, exemple sonore 10) et en M2 (b, exemple sonore 11).*

| Chanteur | Note | Δ ER(FB2) | Δ SPL |
|---|---|---|---|
| S1 | FB2 faible | | |
| S2 | do3 / sib2 | - 5 dB | 0 dB |
| S3 | ré3 / do3 | - 8 dB | - 5 dB |
| S4 | do3 / sib2 | - 4 dB | - 4 dB |
| MS1 | FB2 faible sur tout le M2 - /o/ | | |
| MS2 | FB2 faible sur tout le M2 - /o/ | | |
| MS3 | FB2 fort sur tout le M2 - /o/ | | |
| MS4 | do3 / sib2 | - 7 dB | 0 dB |
| CT1 | fa#2 - sol#2 | - 4 dB | - 4 dB |
| CT2 | fa#2 - sol#2 | - 10 dB | 0 dB |
| T1 | FB2 sans variation brusque avec f0 | | |
| T2 | FB2 très inhomogène | | |
| T3 | FB2 très inhomogène | | |
| T4 | do3 - sib2 | - 4 dB | - 2 dB |
| Bar1 | do3 - sib2 | - 5 dB | - 3 dB |
| Bar2 | FB2 faible sur tout le M2 - /o/ | | |
| Bar3 | do3 - sib2 | - 8 dB | - 2 dB |
| Bar4 | do3 - sib2 | - 3 dB | 0 dB |
| B1 | do3 - sib2 | - 3 dB | 3 dB |
| B2 | FB2 faible sur tout le M2 - /o/ | | |
| B3 | do3 - sib2 | - 10 dB | 6 dB |

TAB. 7.2 – *Notes sur lesquelles ER(FB2) varie brusquement en mécanisme M2, et intervalle de variation de ER(FB2) et SPL, détaillées pour chaque chanteur.*

## 7.3 Étude de l'énergie dans FB3

### 7.3.1 ER(FB3) et intensité

La figure 7.14 présente deux spectres de decrescendos, produits par MS4 sur la voyelle /a/ et sur le mi3. Nous précisons que sur cette voyelle, MS4 ne présente pas de phénomène de saturation de ER(FB2). Ces deux figures nous permettent d'étudier, chez cette chanteuse, qui est susceptible d'utiliser les deux mécanismes laryngés à cette hauteur, l'évolution du spectre en fonction de l'intensité dans les deux mécanismes. Constatons d'abord que MS4 est partie de 100 dB en M1 et de 90 dB en M2, ce qui correspond au niveau de limite supérieure de ses phonétogrammes en mécanisme M1 comme en M2 (sur cette voyelle).

Nous constatons :

- en M1 comme en M2, l'énergie des bandes FB2 et FB3 augmente avec l'intensité.
- la répartition de l'énergie n'est pas identique en M1 et en M2. En particulier, la largeur de bande du formant du chanteur et l'étendue fréquentielle du renforcement situé dans FB3 (appelé formant à l'octave par Pillot, 2004) sont plus grandes en mécanisme M1 qu'en M2.
- la diminution de l'énergie dans FB2 est assez régulière, sauf dans les faibles intensités (le niveau reste stable de 75 à 70 dB en M1, et varie fortement en M2).
- la diminution de l'énergie de FB3 n'observe pas la même régularité que celle de FB2. Par exemple, ER(FB3) varie peu de 85 à 80 dB en M1 (sur cet exemple) alors que ER(FB2) varie fortement.
- la comparaison des deux figures montre une différence importante de l'énergie dans FB3 entre les productions de M1 et de M2, à hauteur donnée. Cette différence est de l'ordre de 10 dB. Nous reviendrons sur ce résultat dans la partie 7.3.2.

La figure 7.15 présente l'évolution du spectre et l'évolution des ER(FB2) et ER(FB3) en fonction de l'intensité, au cours d'un decrescendo. Sur la figure de gauche, nous retrouvons le

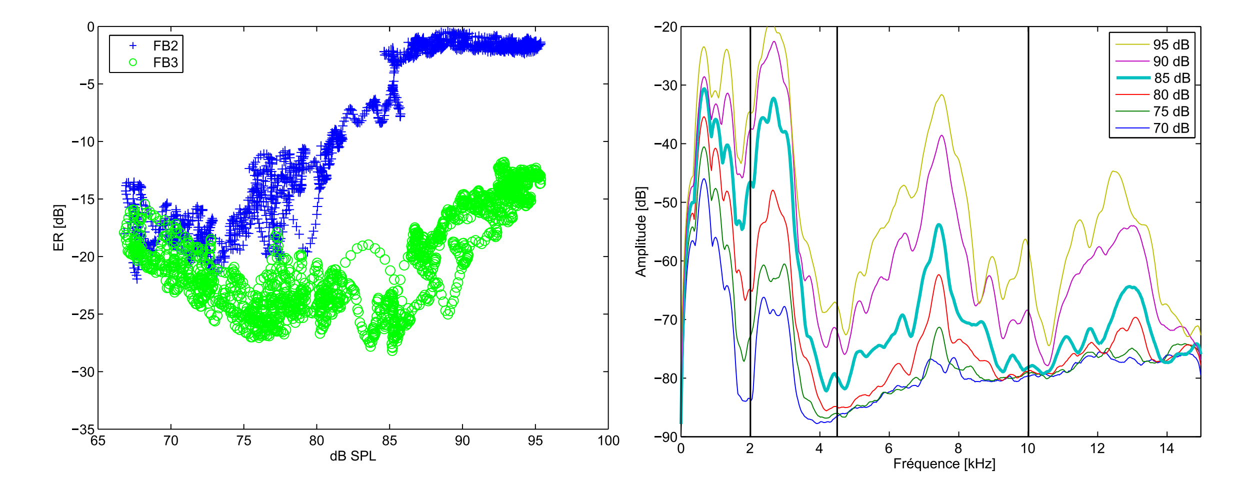



FIG. 7.15 – *Decrescendo produit par T1. Voyelle /a/, mi3, mécanisme M1. La figure de gauche présente l'évolution de ER(FB2) et de ER(FB3) en fonction du niveau SPL, et celle de droite l'évolution globale du spectre en fonction de l'intensité lors de la production de ce decrescendo (exemple sonore 7).*

phénomène de saturation décrit dans la partie 7.2 à propos de ER(FB2), pour les intensités supérieures à 85 dB. En partant du fortissimo, le chanteur a commencé par diminuer fortement son ER(FB3), alors que ER(FB2) restait constant. À 85 dB et en dessous en revanche, alors que le FB(FB2) diminue linéairement, ER(FB3) reste à peu près stable, voire ré-augmente (en dessous de 75 dB), ce qui dénote que l'énergie dans FB3 reste constante. Nous pouvons également constater sur les spectres qui sont tracés figure 7.15 que le passage en dessous de 90 dB est marqué par une diminution soudaine et très importante de l'énergie du 4è harmonique (aux alentours duquel se trouve le deuxième formant). Sur cet exemple donc, la diminution d'intensité est accompagnée d'une diminution de l'énergie, d'abord dans FB3, puis dans FB2.

### 7.3.2 ER(FB3) et mécanisme laryngé

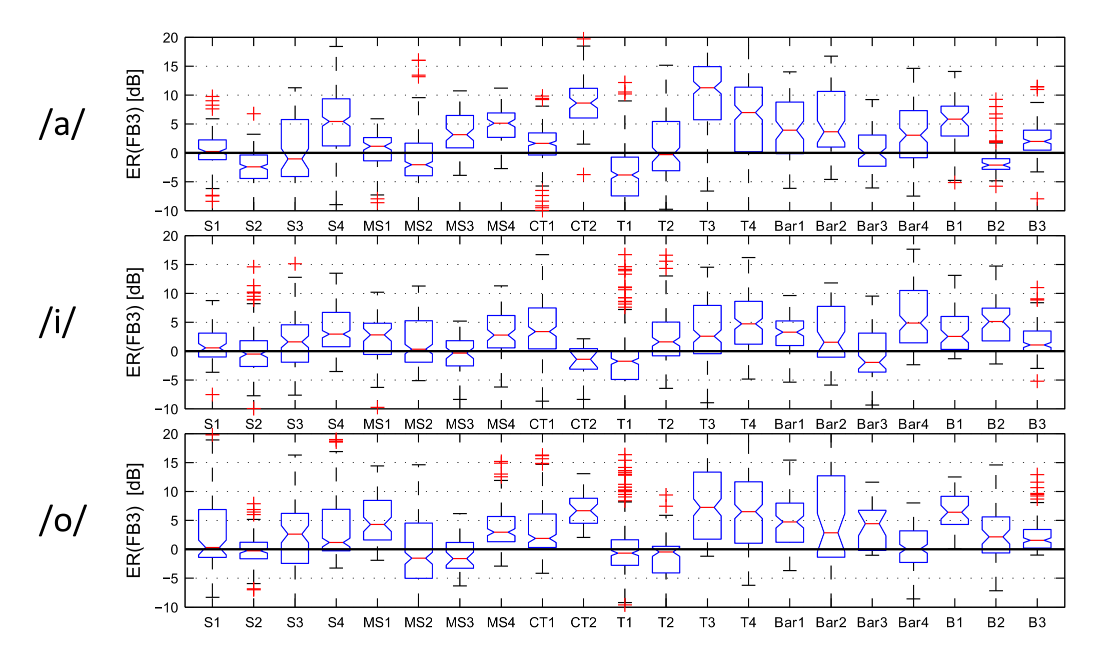



FIG. 7.16 – *Statistiques de la différence de ER(FB3), en dB, entre les productions de M1 et celles de M2 (ER(FB3,M1) – ER(FB3,M2)), à même hauteur et même intensité. Les résultats sont détaillés pour chaque chanteur et chaque voyelle.*

**Tendance générale**

La figure 7.16 présente, pour chaque voyelle séparément, les statistiques sur la différence de ER(FB3) entre les mécanismes M1 et M2. Sur la voyelle /a/, 14 chanteurs sur 21 présentent une valeur médiane positive, c'est à dire que ces 14 chanteurs présentent dans plus de 50 % de leur surface de recouvrement des mécanismes plus d'énergie en M1 qu'en M2 dans FB3. Sur /i/ et /o/ ils sont 16 dans cette situation, soit plus de 75 % des chanteurs. Comme nous l'avons présenté sur les spectres de la figure 7.14 ainsi que lors d'une étude introductive (Lamesch et Doval, 2007), il semble y avoir moins d'énergie dans cette bande en M2 qu'en M1, même chez les chanteurs présentant le même ER(FB2) en M1 et en M2. Nous pouvons donc penser que cette différence est liée à la source.

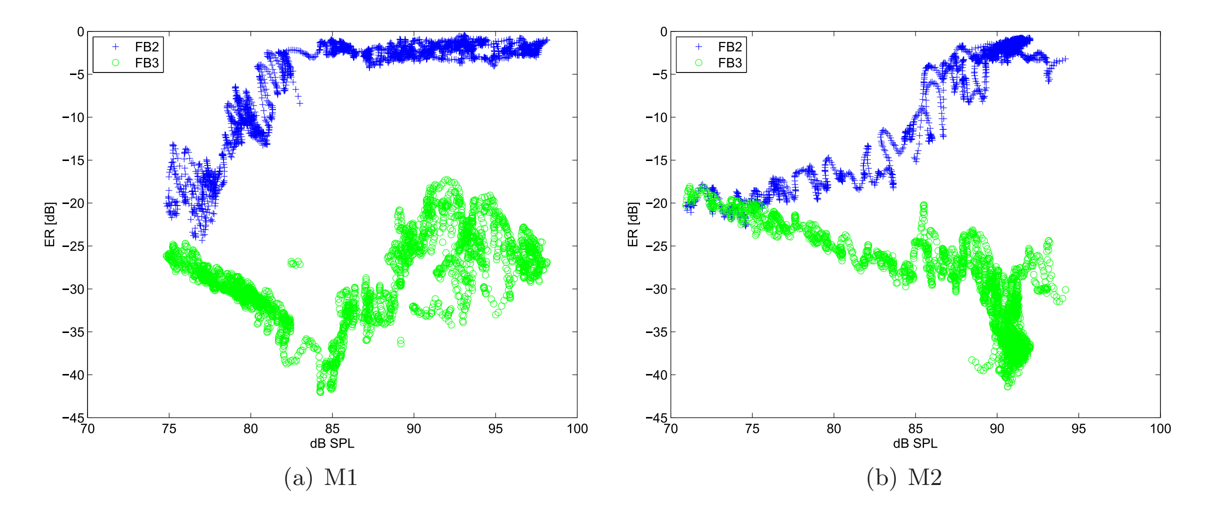



FIG. 7.17 – *ER(FB3) et ER(FB2) relevés sur les productions de MS4 sur la voyelle /i/ et sur un mi3, en mécanisme M1 (a) et en M2 (b).*

**Discussion d'un exemple particulier**

La figure 7.17 présente deux autres exemples de productions (crescendo et decrescendo confondus) effectués par MS4 sur le fa#3. Nous avons choisi de présenter des productions obtenues sur la voyelle /i/, pour laquelle, comme nous pouvons le vérifier, MS4 présente la saturation de ER(FB2), notamment en M1. Nous pouvons observer ici deux stratégies différentes en fonction du mécanisme laryngé quant à ER(FB3). En mécanisme M1, il diminue quand l'intensité augmente de 75 dB à 83 dB, ce qui correspond à la zone d'augmentation linéaire de ER(FB2). De 85 à 92 dB, ER(FB3) augmente avec l'intensité alors que ER(FB2) est saturé. Puis au-delà de 92 dB, ER(FB3) redescend et présente une variabilité importante. L'évolution ER(FB2) et ER(FB3) en mécanisme M2 est très différente : au-delà de 95 dB, alors que ER(FB2) est saturé, ER(FB3) diminue fortement.

Cet exemple laisse donc à penser que, pour cette hauteur, la chanteuse augmente d'abord FB2, puis FB3 en mécanisme M1, alors qu'elle augmente FB2 en mécanisme M2, FB3 n'augmentant pas ou peu. Cet exemple illustre donc une stratégie différenciée d'évolution de la répartition de l'énergie dans le spectre en fonction du mécanisme laryngé.

### 7.3.3 ER(FB3) et voyelles

La figure 7.18 présente les différences de ER(FB3) observées, en M1 et en M2, entre les voyelles /i/ et /a/. Nous constatons que, dans les deux mécanismes, les différences mesurées sont positives, c'est à dire que ER(FB3) est supérieur sur /i/ que sur /a/. Nous retrouvons ainsi la tendance observée sur FB2.

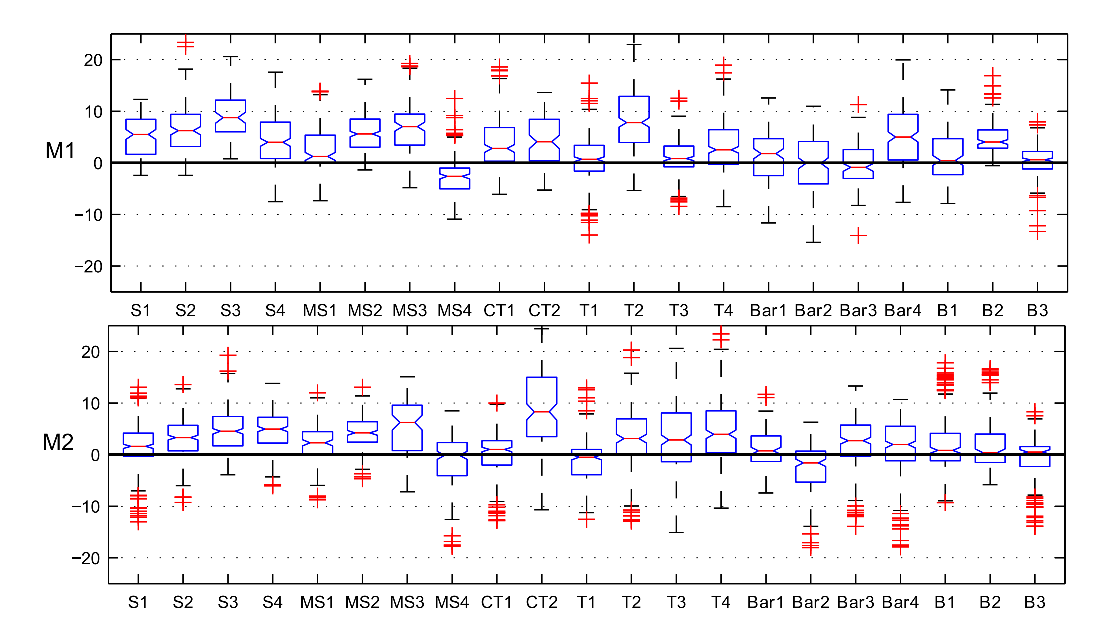



Fig. 7.18 – *Statistiques de la différence de ER(FB3), en dB, entre les productions sur /a/ et celles sur /i/(ER(FB3,/i/)−ER(FB3,/a/)), à même hauteur et même intensité, en mécanisme M1 (figure de haut) d'une part, et M2 (figure du bas) d'autre part. Les résultats sont détaillés pour chaque chanteur.*

### 7.3.4 Conclusions

L'étude comparée des productions de T1 et MS4 nous permet de tirer les conclusions suivantes : l'énergie dans la bande FB3 peut varier avec l'intensité. Dans les nuances pianissimo elle peut ne pas varier (ce qui se manifeste par un ER(FB3) qui décroît linéairement avec une pente de -1 dB/dB), mais elle varie dans les intensités fortes. En mécanisme M1, chez les deux sujets étudiés, l'énergie de cette bande augmente plus vite que le SPL quand le niveau du formant du chanteur atteint la saturation. En mécanisme M2, il n'augmente pas nécessairement dans cette situation.

Globalement, l'énergie dans FB3 est plus faible en M2 qu'en M1, et varie comme FB2 en fonction de la voyelle.

## 7.4 Bilan du chapitre

Au cours de ce chapitre, nous avons étudié la répartition de l'énergie dans le spectre en fonction de l'intensité, du mécanisme laryngé et de la voyelle. Pour cela nous avons défini trois bandes spectrales du grave à l'aigu, appelées FB1, FB2 et FB3, dont les bornes sont 0-2 kHz, 2-4.5 kHz et 4.5-10 kHz pour les hommes, et 0-2.4 kHz, 2.4-5.4 kHz et 5.4-12 kHz pour les femmes. ER(FBi) désigne le rapport entre l'énergie dans la $i^{ième}$ bande et l'énergie totale. FB2 correspond à la bande fréquentielle où est situé le formant du chanteur.

#### ER(FB2)

- Globalement, ER(FB2) augmente avec l'intensité.
- L'augmentation de l'énergie dans FB2 est donc habituellement plus rapide que celle du SPL, mais dans certains cas elle devient égale à celle du SPL, voire plus lente. Cette situation correspond à un phénomène de saturation de ER(FB2), rencontrée :
  - sur /i/ : chez tous les chanteurs en M1 ; et chez les chanteurs de M2, professionnels, en M2.
  - sur /a/ : chez les chanteurs de M1, professionnels, en M1 et dans la zone fréquentielle qu'ils utilisent le plus.

- ER(FB2) varie avec la voyelle. Il est le plus grand sur /i/, puis sur /a/, puis sur /o/. Ces différences peuvent être expliquées en modélisant les formants par des filtres d'ordre 2. Cependant les différences observées sont surestimées par le modèle utilisé.
- Chez les chanteurs de mécanisme M1, le formant du chanteur est plus intense en M1 qu'en M2. Les chanteurs de M2 ont un formant du chanteur aussi intense en M1 qu'en M2 dans la zone de recouvrement des mécanismes, notamment sur les voyelles /i/ et /a/. Sur la voyelle /o/, les chanteurs ne parviennent pas à maintenir l'énergie du formant du chanteur dans la partie la plus grave de la tessiture du mécanisme M2.

**ER(FB3)**

- La répartition de l'énergie dans le spectre varie en fonction de la hauteur, de l'intensité. Différentes tendances ont été observées.
- À hauteur et intensité fixes, l'énergie dans FB3 est plus faible en M2 qu'en M1, indépendamment de l'entrainement vocal et de la voyelle.
- ER(FB3) varie en fonction de la voyelle. Il est plus grand sur /i/ que sur /a/, dans les deux mécanismes laryngés, comme ER(FB2).

# Quatrième partie

# Transitions de mécanismes laryngés

# Chapitre 8

# Théorie et techniques vocales

Après nous être intéressés à l'influence de la voyelle sur la vibration laryngée par rapport aux aspects de dynamique et spectraux, nous allons maintenant nous pencher sur l'influence qu'elle peut avoir sur les transitions de mécanismes laryngés. Notre but est de comprendre comment la transition de mécanisme est gérée en fonction de la voyelle utilisée.

Il est possible d'étudier l'ensemble des transitions de mécanismes (M0-M1, M1-M2, M2-M3 et inversement). Néanmoins la transition M1-M2 est celle qui est la plus communément travaillée, et nous nous focaliserons dessus dans l'ensemble de cette partie.

Dans un premier temps nous allons décrire le phénomène physique de la transition de mécanisme laryngé et comment il est utilisé dans plusieurs traditions musicales. Dans le chapitre suivant, nous présenterons les bases de données que nous avons été amenés à enregistrer, avant de décrire les résultats que nous en avons tirés.

## 8.1 Description du phénomène physique

Nous avons vu dans la section 1.2 que les mécanismes vibratoires laryngés consistent en différentes configurations vibratoires laryngées. La transition d'un mécanisme à l'autre est souvent effectuée de manière brutale, et peut être marquée par une perte de contrôle de l'appareil vocal. Elle peut se manifester par quelques millisecondes de «chaos», au cours desquelles la vibration laryngée n'est plus quasi-périodique ; par quelques périodes avec perte d'accolement glottique ou avec doublement de période ; mais dans de nombreux cas elle est marquée par une variation brutale de la fréquence d'oscillation des cordes vocales, que le chanteur s'empresse de corriger ou d'adapter ensuite. C'est ce phénomène que nous allons maintenant décrire.

### 8.1.1 Exemple de transition M1-M2

La figure 8.1 correspond à un extrait d'une production du chanteur B3, alors qu'il cherchait à effectuer des alternances de mécanismes laryngés en restant sur la même note (mi3, 329 Hz). À l'instant t = 0, le chanteur est en mécanisme M1. De t=0.25 s à t = 0.81 s, il est en mécanisme M2, puis il revient ensuite en mécanisme M1. Le paramètre $\Delta f_0$ décrit l'intervalle du saut de fréquence. Dans le sens M1→M2, la fréquence augmente brutalement. Dans le sens M2→M1, c'est l'inverse, elle diminue brutalement. Sur l'exemple présenté ici, nous constatons que, conformément au protocole imposé, le chanteur a réajusté la fréquence fondamentale à la fréquence cible après chaque transition. Ce réajustement observé après les transitions est ici anticipé très légèrement dans le sens M1→M2 par une diminution de la fréquence avant le saut, et de façon plus marquée par une augmentation de fréquence précédant la transition M2→M1.

L'étude du signal EGG ainsi que du quotient ouvert montre une phase transitoire glottique effectuée en mécanisme M1 juste avant le déclenchement du saut de fréquence lors de la transition M1→M2. Cette phase est marquée par une réduction de l'amplitude du signal EGG ainsi qu'une augmentation graduelle du quotient ouvert, de 0.5 à 0.8 sur l'exemple présenté. Il en résulte que le temps de perturbation de l'EGG, $\Delta t_{EGG}$, est supérieur au temps effectif du saut de fréquence

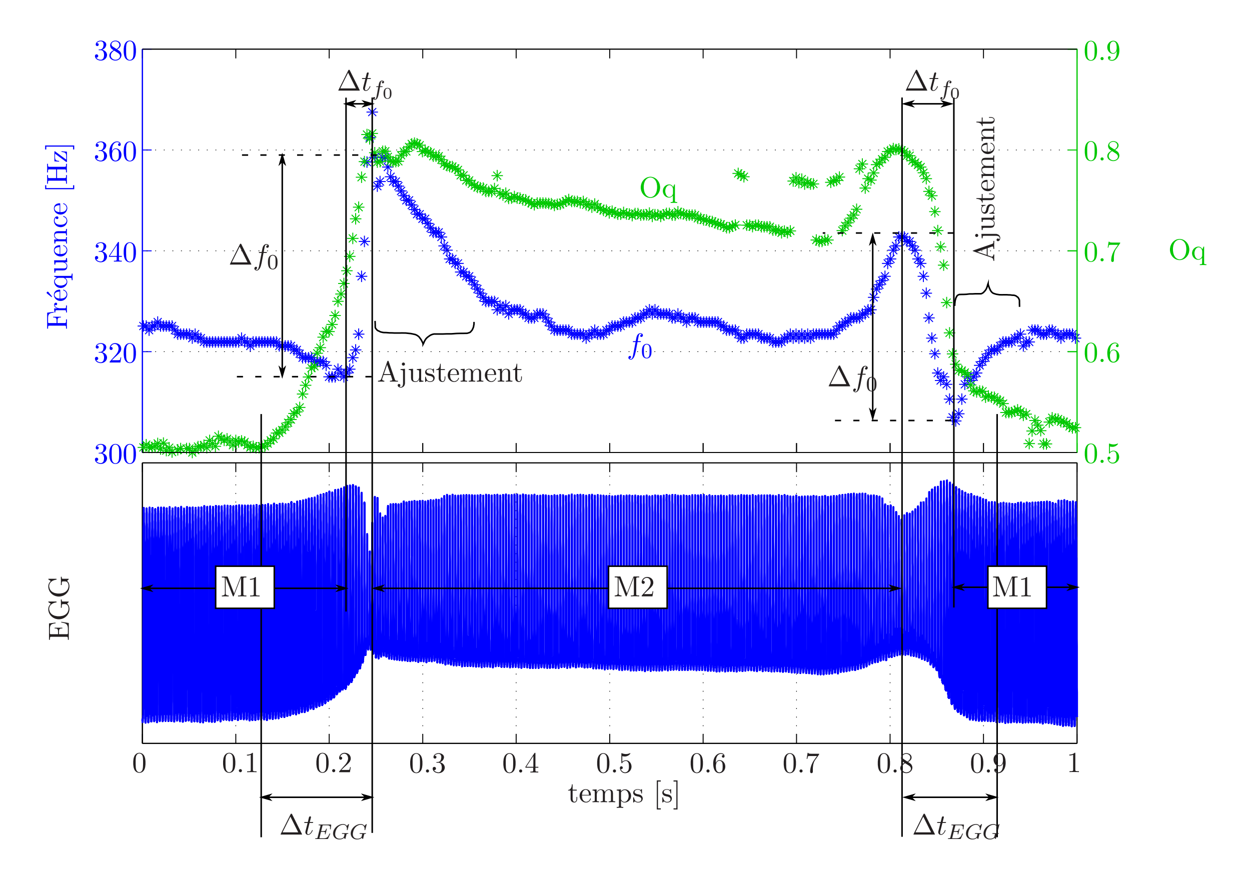



Fig. 8.1 – *Description des transitions de mécanismes laryngés, à partir d'un exemple produit par B2 sur la note mi3, et sur la voyelle /i/.*

$\Delta t_{f_0}$. En mécanisme M2, l'amplitude du signal EGG se stabilise à une valeur plus faible qu'en mécanisme M1, ce qui correspond à une surface d'accolement glottique plus faible en M2 qu'en M1 (comme nous l'avons vu dans la partie 1.2). Cependant, le quotient ouvert ne s'est pas stabilisé sur cet exemple, puisqu'il varie entre 0.8 et 0.7 en M2. Si le chanteur était resté plus longtemps en M2, le quotient ouvert se serait probablement stabilisé. Lors de la transition M2→M1, l'amplitude du signal EGG varie également. Cette variation est déclenchée au début de la transition, et se poursuit (ainsi que la diminution de quotient ouvert) alors que la fréquence est déjà stabilisée, il en résulte comme dans le sens M1→M2 que $\Delta t_{EGG}$ est supérieur à $\Delta t_{f_0}$.

**Ordre de grandeur**

Les variations d'**amplitude du signal EGG** lors de transitions sont importantes. Roubeau (1993) a estimé que l'amplitude du signal EGG diminuait de 59 % en moyenne pour les hommes et de 44% pour les femmes lors de la transition M1→M2, et augmentait de 374 % pour les hommes et de 129 % pour les femmes lors d'une transition M2→M1. Le lecteur peut se reporter à la section 6.1 pour une étude approfondie de l'enveloppe du signal EGG en M1 et en M2.

**La durée du saut de fréquence** est extrêmement courte. Roubeau *et al.* (1987) l'estiment à quelques millisecondes, soit un ou deux cycles glottiques. Sur l'exemple que nous avons présenté, cette durée est un peu plus grande, de l'ordre de 50 ms dans le sens M2→M1, et de 20 ms dans le sens M1→M2. Les temps de réajustement post-transitions sont plus longs, et varient de 40 à plus de 120 ms en fonction du protocole d'étude, du sexe du chanteur, du sens de la transition étudiée (d'après Roubeau *et al.*, 1989).

La fréquence de déclenchement des transitions de mécanismes a également été étudiée. Pour cela, la méthode utilisée consiste à demander aux sujets de produire des glissandi ascendant et descendant, avec transitions de mécanismes (Roubeau, 1993). Globalement, la transition se déclenche dans la zone de recouvrement des mécanismes laryngés, à une hauteur exacte qui peut varier selon le sujet. La transition M2→M1 est déclenchée à une hauteur plus grave que la hauteur d'arrivée du saut M1→M2, ce qui traduit que le glissando descendant n'est pas le

simple symétrique du glissando ascendant. Il y a donc un phénomène d'hystérésis concernant la hauteur de déclenchement de la transition.

### 8.1.2 Protocoles expérimentaux

Les différents auteurs s'étant intéressés à l'intervalle du saut (paramètre $\Delta f_0$ sur la figure 8.1) ont mis en place des protocoles expérimentaux parfois très différents. Nous allons présenter les principaux, leurs avantages et inconvénients.

Roubeau (1993) a étudié l'intervalle du saut à travers deux protocoles : d'une part des glissandi ascendant et descendant, d'autre part des notes tenues. Ce deuxième protocole, suggéré par Large *et al.* (1972), impose au sujet de tenir un son à la même hauteur tout en effectuant des alternances M1 - M2. Le sujet se doit donc de corriger aussi vite que possible les sauts de fréquence qui se produisent lors des transitions. Ce type de production est a priori assez éloigné de la pratique musicale, quoi qu'il ait été suggéré explicitement par Garcia (1856) dans sa méthode de chant (voir figure 8.2).
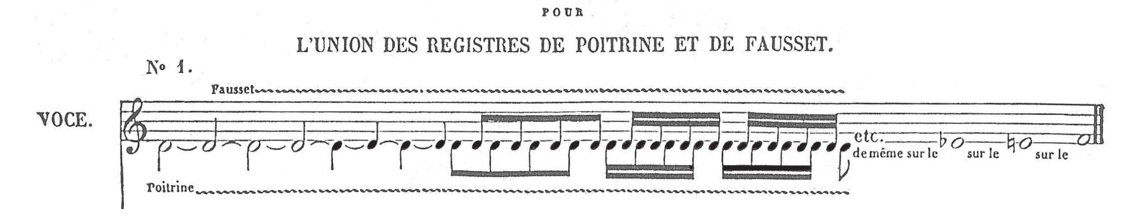



FIG. 8.2 – *Exemple d'exercice proposé par Garcia (1856) dans sa méthode de chant, ayant pour but d'unifier les registres de poitrine et de falsetto, que nous associons aux mécanismes M1 et M2.*

Svec et Pesak (1994) ont choisi d'étudier la transition M1→M2 en effectuant une augmentation de débit (les auteurs ne donnent pas plus de détails). Plus tard, Svec *et al.* (1999) ont fait subir à leurs trois sujets un petit entrainement pour les amener à produire des transitions de la façon la moins contrôlée possible. Il leur était notamment demandé d'effectuer des alternances de mécanismes laryngés (dénommé par *chest* et *falsetto registers* dans la publication) sans viser d'intervalle particulier entre les deux modes de production. Les auteurs ont néanmoins noté que lors des transitions qu'ils ont enregistrées, une légère adaptation de fréquence était observée après le saut (comparable à notre période de réajustement) pour faire en sorte que l'intervalle du saut corresponde à un intervalle de la gamme. Plus tard, les mêmes auteurs (Miller *et al.*, 2002) ont proposé un protocole plus restrictif pour étudier les sauts de fréquences, qu'ils proposent de dénommer *characteristic leap interval*. Ils donnent en particulier cinq conditions à remplir, parmi elles, ils explicitent la nécessité que le changement de mécanisme (les auteurs utilisent le mot *registre*) soit effectué entre deux hauteurs, mais que la hauteur d'arrivée ne soit pas contrôlée par le sujet. Cette dernière doit résulter spontanément des ajustements laryngés consécutifs au changement de mécanisme. Concrètement, les auteurs ont demandé à leur sujet de maintenir la pression sous-glottique constante (estimée à partir d'une mesure de pression oesophagienne) lors des transitions.

L'idée de Svec & collaborateurs de chercher à maintenir la pression sous-glottique constante en n'effectuant la transition que par modification du débit est intéressante, néanmoins le protocole qu'ils proposent laisse aux sujets la responsabilité de ne pas effectuer d'ajustement de fréquence après la transition, ce qui est une tâche difficile compte tenu de l'inexpérience de la population (même parmi les chanteurs lyriques) par rapport à ce type de production. De ce point de vue, l'idée d'imposer au sujet de revenir à la même note de départ après le saut semble être plus valide car elle impose au sujet une consigne claire et permet une mesure fiable de l'intervalle du saut. Néanmoins la façon d'effectuer le réajustement n'est pas maîtrisée par le protocole. Nous considérons que cet inconvénient n'est pas gênant dans la mesure où nous nous

intéressons uniquement à l'intervalle du saut, qui comme nous l'avons vu, se produit dans un temps très court, ne laissant pas au sujet le temps d'effectuer de modifications importantes au niveau sous-glottique. Nous adopterons donc le protocole des notes tenues à la suite de Roubeau (1993) et de Large *et al.* (1972).

### 8.1.3 Modèles descriptifs ou explicatifs

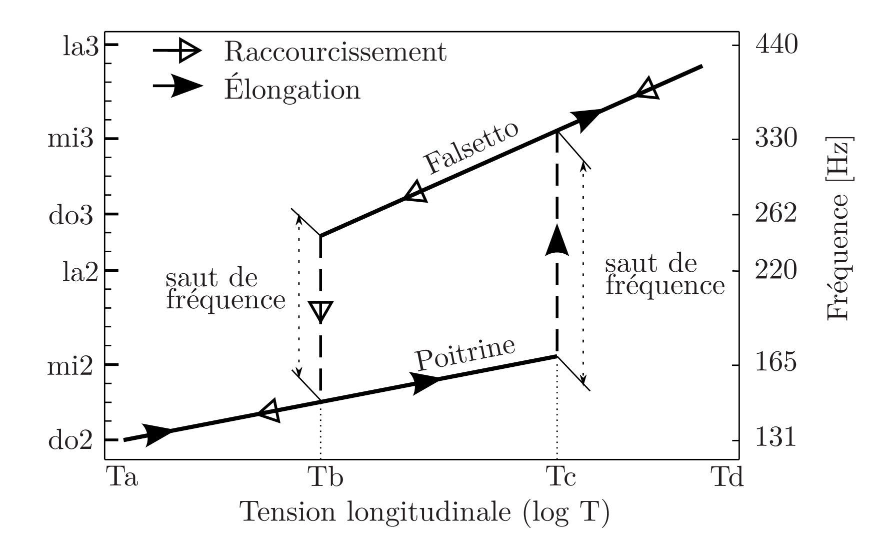



FIG. 8.3 – *Illustration de la variation de hauteur en fonction de la tension longitudinale appliquée par Van den Berg sur un larynx excisé. Adapté de Svec* et al. *(1999)*

La cause physiologique de ce saut de fréquence est longtemps restée inexpliquée. Comme la fréquence de vibration est contrôlée par l'activité des muscles laryngés, une première hypothèse consiste à supposer que le saut de fréquence est dû à une modification soudaine de l'activité d'au moins un des muscles laryngés. Par rapport à cette hypothèse, Svec *et al.* (1999) ont décrit un phénomène intéressant en se basant sur une vidéo produite par Van den Berg, montrant un larynx excisé auquel il applique une tension longitudinale, qu'il fait ensuite varier. Le résultat de cette expérience est schématisé figure 8.3. Partant de la tension Ta, et alors que la tension longitudinale augmente, la fréquence vibratoire augmente en conséquence. À une certaine tension (Tc), et alors que l'expérimentateur continue à faire croître linéairement la tension, la fréquence saute d'un régime de type M1 (appelé *chest* par les auteurs, traduit par poitrine sur la figure) à un autre régime de type M2 (*falsetto* dans l'original). Continuant d'augmenter la tension (jusqu'à Td), la fréquence continue à augmenter linéairement. L'expérimentateur fait ensuite décroître la tension, provoquant une diminution de la fréquence. À Tc, les cordes vocales continuent à vibrer sur un régime de type M2, ce n'est qu'à une tension Tb<Tc que la fréquence de vibration ressaute à une fréquence inférieure, la vibration glottique redevenant de type M1. Cette expérience montre que pour une même tension des cordes vocales (comprise entre Tb et Tc), deux configurations vibratoires sont possibles. Cette expérience est en accord avec les observations des cycles d'hystérésis que nous avons évoqué à propos des transitions de mécanismes se produisant lors de glissandi.

L'hypothèse de non-linéarité du comportement vibratoire des cordes vocales a été étudiée à partir de larynx excisés (Berry *et al.*, 1996), ou à partir de modèles physiques tels que le modèle à deux masses (Lucero, 1993; Steinecke et Herzel, 1995; Lucero, 1996). Un système dynamique non-linéaire a pour caractéristique que le paramètre de sortie (la fréquence fondamentale pour notre propos) puisse varier de façon non-continue alors que les paramètres d'entrée varient continument. Berry *et al.* (1996) ont ainsi étudié la vibration laryngée sur des larynx canins excisés, et ont contrôlé la pression sous-glottique et un paramètre définissant l'asymétrie des cordes vocales. Dans le plan défini par ces deux paramètres, ils ont établi des zones dans lesquelles le larynx a une vibration de type M1, d'autres où il a une vibration de type M2, et des zones de recouvrement, le passage d'un type de vibration à l'autre s'effectuant avec une discontinuité

de fréquence fondamentale. De plus amples développements sur la théorie des systèmes dynamiques non-linéaires appliquée à l'oscillation des cordes vocales sont disponibles aux références suivantes : Titze *et al.* (1993) et Herzel (1995).

Appliquées aux transitions M1-M2 sur un larynx humain vivant, ces études laissent penser qu'il est possible que la fréquence de vibration des cordes vocales varie brutalement alors que l'activité des muscles laryngés et la pression sous-glottique varient continument. D'après Roubeau (1993), les transitions seraient dues à des variations subites de masse vibrante, phénomène typiquement produit par le découplage des différentes couches constitutives des cordes vocales (pour le sens M1→M2).

Nous pouvons constater que l'ensemble de ces descriptions ne prennent pas en ligne de compte le conduit vocal, et encore moins la voyelle. Cette dernière n'apparait donc pas comme un élément moteur de la transition laryngée. Nous allons maintenant quitter pour quelques lignes les descriptions physiques de ces transitions pour voir comment les chanteurs se les sont appropriées, et si les voyelles ont pour eux une importance vis-à-vis de ces transitions.

## 8.2 Transitions M1-M2 et techniques vocales

Les mécanismes laryngés étant communs à l'ensemble des humains, chaque culture a dû apprendre à utiliser d'une façon ou d'une autre les transitions de mécanisme laryngé. Nous allons illustrer trois d'entre elles : la musique lyrique occidentale où les transitions sont masquées, les musiques traditionnelles utilisant le yodel, et la musique traditionnelle iranienne utilisant le tahrir.

### 8.2.1 Le chant lyrique : masquer !

Nous avons vu dans la partie 2 que les chanteurs lyriques professionnels avaient pour objectif d'obtenir un timbre homogène sur l'ensemble de leur tessiture. Or l'utilisation des différents mécanismes laryngés peut, dans certains cas, être un obstacle à cette homogénéité de timbre. Pour remédier à cette difficulté, les chanteurs adoptent habituellement deux stratégies : soit ils ne chantent que dans un mécanisme laryngé (comme les basses ou barytons qui n'utilisent que le M1), soit ils utilisent les deux mécanismes, et travaillent à obtenir une transition de mécanisme laryngé la moins audible possible. Ce travail concerne essentiellement les contre-ténors et les voix de femmes. Le geste vocal nécessaire pour adoucir la transition de mécanisme laryngé peut, en fonction du chanteur, être plus ou moins long à acquérir.

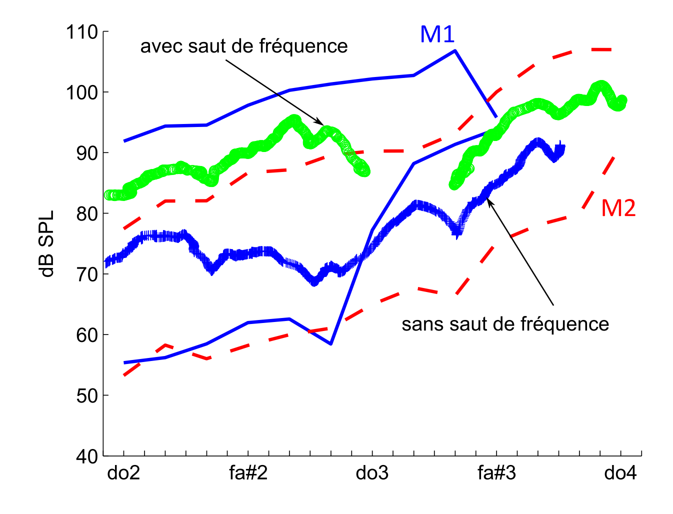



Fig. 8.4 – *Illustration de transitions de mécanismes laryngés dans le plan phonétographique. Á l'intérieur des phonétogrammes de M1 et de M2, les deux lignes correspond à des trajectoires suivies par CT1 dans la production de deux glissandi ascendants, l'un en masquant le saut de fréquence, l'autre en ne le masquant pas. La voyelle utilisée est le /o/.*

La figure 8.4 présente, dans le plan phonétographique, deux glissandi ascendants effectués par CT1. Ce chanteur est entrainé à passer d'un mécanisme à l'autre sans laisser entendre de rupture, et est capable de produire sur demande des glissandi avec ou sans saut de fréquence. Sur cette figure, nous pouvons nettement constater dans un cas le saut de fréquence d'une tierce majeure (4 demi-tons) environ marquant la transition de mécanisme, alors que dans l'autre cas nous ne voyons aucun saut de fréquence, la transition de mécanisme étant probablement effectuée au niveau du la2 (cette figure seule ne permet pas de l'affirmer). Nous constatons que pour masquer le passage de mécanisme, le chanteur a effectué son glissando dans une nuance beaucoup plus piano que dans l'autre cas. Cette technique permettant de lisser la transition de mécanismes laryngés a déjà été observée (Roubeau, 1993; Henrich, 2001). Intuitivement, nous pouvons considérer cette stratégie comme étant parfaitement cohérente, puisque pour effectuer une transition sans saut de fréquence, le premier critère est de se placer dans la zone de recouvrement pour effectuer cette transition. C'est exactement ce qu'a effectué CT1.

En pratique, si un chanteur doit effectuer une transition de mécanisme, il l'effectuera dans une situation où d'autres facteurs tendent à la masquer, comme un changement de note ou de voyelle par exemple. Il est très rare qu'il soit amené à l'effectuer sur une note tenue ou sur un glissando comme c'est le cas ici.

### 8.2.2 Le yodel : rappel des voyelles utilisées

Le yodel est une technique vocale tout à fait opposée à la technique lyrique dans la mesure où elle cherche à jouer sur le contraste entre les mécanismes M1 et M2 et utilise donc pleinement les transitions de mécanismes. Il s'agit d'une musique vocale, sans paroles, polyphonique ou non. Elle est connue en Europe pour être caractéristique de la musique populaire suisse et tyrolienne, mais nous retrouvons des techniques similaires dans des musiques traditionnelles d'autres continents, notamment en Afrique (Fürniß, 1988, 1991).

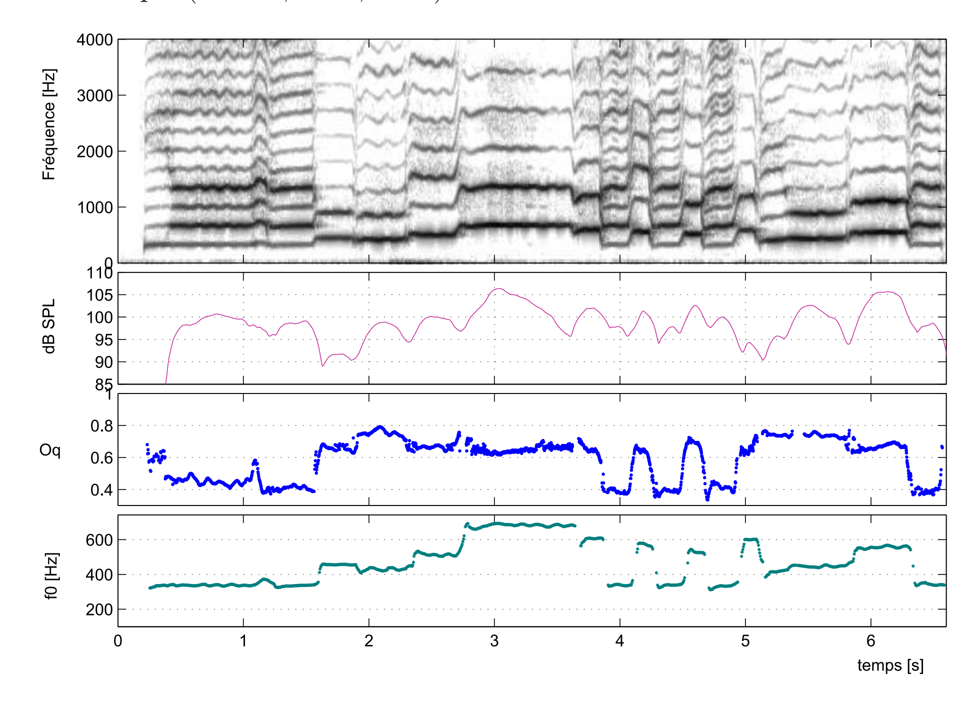



FIG. 8.5 – *Exemple de yodel suisse. La courbe de quotient ouvert montre bien une alternance entre des valeurs faibles (0.4) et des valeurs élevées (0.7), traduisant l'alternance des mécanismes laryngés, notamment dans la période de 4 à 5 secondes de cet extrait (exemple sonore 12).*

La figure 8.5 présente un exemple de yodel suisse. La courbe de quotient ouvert nous permet de visualiser clairement les parties produites en mécanisme M1 et celles produites en mécanisme M2.

Lors de sa venue au laboratoire, cette chanteuse de yodel (Barbara Klossner) nous a confié que dans le style du yodel suisse, les notes produites en mécanisme M1 étaient chantées sur la

voyelle /o/ (la voyelle tendant à s'ouvrir vers un /a/ quand la chanteuse monte dans l'aigu du mécanisme M1), et les notes en mécanisme M2 sur les voyelles /y/ ou /u/. Selon elle, la voyelle /i/ n'est pas utilisée dans le yodel suisse, mais l'est dans le yodel tyrolien (toujours pour les productions en mécanisme M2).

Fürniß (1991) a effectué une revue bibliographique détaillée des voyelles utilisées dans des musiques yodlées, extraites de différentes cultures. Ayant étudié le yodel autrichien, alpin, centre-africain, gabonais et zaïrois, elle a constaté que les voyelles utilisées en registre grave (que nous attribuons au mécanisme M1) sont les voyelles [e, ɛ, a, ɔ, o] et que celles utilisées en registre aigu (mécanisme M2) sont les [i, y, u]. Fürniß a classé ces voyelles en fonction du degré d'ouverture de la mâchoire, et a constaté que les voyelles utilisées en mécanisme M2 correspondaient à celles du premier degré d'ouverture (celui pour lequel la mâchoire est la plus fermée), alors que les voyelles utilisées en mécanisme M1 correspondent à celles des autres degrés d'ouverture. Acoustiquement, ces corrélations doivent se traduire par une fréquence du premier formant très basse (proche de la fréquence fondamentale du signal compte tenu de la hauteur à laquelle chantent les chanteurs) pour les voyelles utilisées en mécanisme M2, et plus haute pour le mécanisme M1.

Ces associations sont intéressantes dans la mesure où elles coïncident avec les observations effectuées dans les méthodes de chant ou les questionnaires de chanteurs (cf. partie 2). Elles posent également question. Pourquoi toutes ces traditions effectuent-elles les mêmes associations entre mécanisme et voyelle ? Ces associations sont-elles effectuées pour favoriser le plus possible la vibration laryngée dans chacun des mécanismes, ou pour favoriser (ou marquer) la transition ? Les changements de voyelles permettent-elles de contrôler l'intervalle des sauts ? Les études présentées dans le chapitre 9 nous permettront de répondre à ces questions.

### 8.2.3 Le tahrir : utilisation de la transition comme ornement

Le tahrir est une technique vocale particulière, apparue selon L. Miller (1999)[1] dans les régions indo-européenne, indo-iranienne ou peut être asiatique, et dont la forme la plus élaborée se pratique aujourd'hui en Iran et en Azerbaïdjan. D'après During (1984), *le tahrir est une appoggiature rapide sur une ou plusieurs notes. [...] La note principale est agrémentée d'un son appogiaturé, chanté en voix de tête lorsque le son principal est en voix de gorge [...].* Il écrit également que *les voix de femmes sont autant appréciées que les voix d'hommes*, et que *le timbre lui-même n'est pas un élément essentiel du chant.* Ainsi selon cette description, et si l'on interprète la description de During en termes de mécanismes laryngés, le tahrir peut être compris comme une technique vocale d'ornementation mettant en jeu les mécanismes M1 et M2 (c'est en tout cas l'hypothèse qu'avance Castellengo, 1991), ce qui expliquerait qu'elle soit accessible aux femmes comme aux hommes (et même aux enfants), et que la finalité musicale porterait plus sur l'appoggiature elle-même que sur le timbre de la voix.

Nous avons cherché à comprendre :

– si cette ornementation était effectivement produite à l'aide de transitions de mécanismes laryngés,
– quelles voyelles les chanteurs utilisaient.

Pour cela une collaboration a été mise en place avec J. During, ethnomusicologue. Les premiers résultats des travaux qui en ont résulté ont été présentés à l'occasion de deux conférences (Castellengo *et al.*, 2007, 2009). Cette collaboration nous a notamment permis d'enregistrer une chanteuse iranienne (Solmaz Badri) maîtrisant le tahrir. Le matériel d'enregistrement est équivalent à celui utilisé pour la base de données de phonétogrammes (cf. section 4.1).

La figure 8.6 présente un exemple de tahrir produit par la chanteuse venue au laboratoire. Les ornements, visibles entre 1 et 2 secondes, correspondent à la technique du tahrir. Il s'agit de très courts passages (de l'ordre de 50 ms) caractérisés par un quotient ouvert élevé, et une fréquence fondamentale de l'ordre d'une tierce supérieure à celle de la note de départ. La ligne mélodique (excepté les ornements) est caractérisée par un quotient ouvert très bas, de l'ordre de

1. Lloyd Clifton Miller est un ethnomusicologue spécialiste du Moyen-Orient, à ne confondre ni avec Richard Miller, ni avec Donald G. Miller

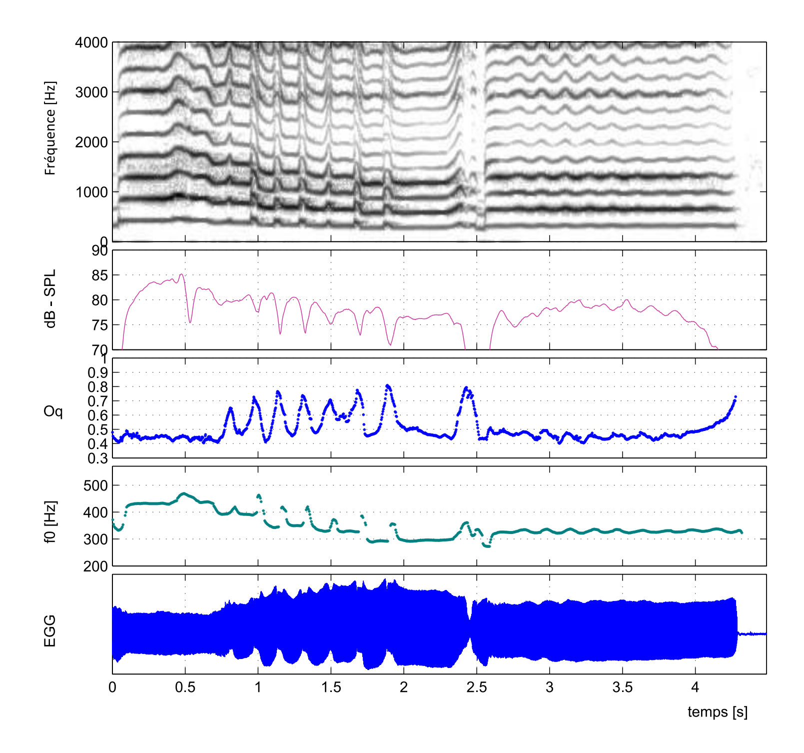



Fig. 8.6 – *Interprétation d'un chant nécessitant l'utilisation du tahrir. Nous présentons, de haut en bas, le spectrogramme, les courbes de SPL, de quotient ouvert, de fréquence vibratoire et d'EGG (exemple sonore 13).*

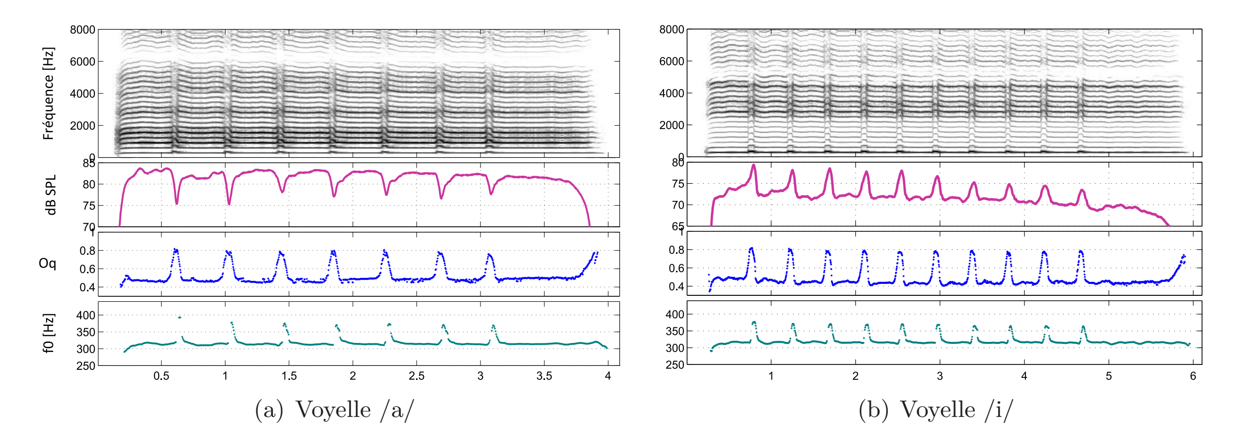
0.4, caractéristique du mécanisme M1 utilisé dans sa partie la plus aigüe, dans une émission commune à beaucoup de musiques traditionnelles. Cet ensemble de caractéristiques montre effectivement que le tahrir correspond à de très courts emprunts de mécanisme M2 dans un chant exécuté en utilisant le mécanisme M1. Il est intéressant de constater que les variations de quotient ouvert sont plus lentes que les sauts de fréquence, ce qui donne même l'impression que le quotient ouvert oscille entre deux valeurs (l'une caractéristique du M1 et l'autre du M2), confirmant notre observation selon laquelle le signal EGG connait une période d'anticipation avant la transition M1→M2, marquée par une diminution de l'enveloppe du signal EGG et une augmentation de quotient ouvert, et une augmentation de l'enveloppe EGG et une diminution du quotient ouvert après la transition M2→M1. Sur l'exemple présenté, la chanteuse effectue au maximum entre 3 et 4 ornements par seconde, mais les chanteurs iraniens peuvent aller jusqu'à 6, voir 7 ornements par seconde.

En termes de tessiture, la chanteuse a produit du tahrir pour une ligne mélodique (chantée en M1) entre les sol2 et do4, mais nous avons recueilli des enregistrements de chanteurs (masculins) allant jusqu'au mi4 (ce qui est assez rare pour être souligné).

**Tahrir et voyelles**

Compte tenu de la brièveté de l'appoggiature en M2, il est probable que les chanteurs n'aient pas le temps de modifier la forme du conduit vocal lors du changement de mécanisme. La chanteuse enregistrée au laboratoire utilise essentiellement une voyelle correspondant à un /o/ ouvert, qui s'ouvre de plus en plus vers le /a/ quand la chanteuse monte dans l'aigu. C'est cette voyelle qui est utilisée sur l'exemple de la figure 8.6, et il est probable que cette modification de voyelle soit liée avec une stratégie d'alignement du premier formant avec le deuxième harmonique. Outre cette voyelle, la chanteuse utilise également beaucoup le /ε/. Il est intéressant de constater que ces deux voyelles sont citées par Fürniß (1991) comme étant aussi utilisées en mécanisme M1 pour le yodel. La chanteuse a également effectué des exemples de tahrir sur /i/, /e/ et /u/ sur un mib3 à titre d'exemple, mais nous en rencontrons peu sur ces voyelles dans la musique. Selon Mozafar Shafi'i, chanteur iranien avec qui s'est entretenu During (2008), le tahrir effectué sur la voyelle /i/ est le plus difficile à effectuer, mais aussi est très recherché pour l'effet musical

qu'il produit.




(a) Voyelle /a/ (b) Voyelle /i/

FIG. 8.7 – *Deux exemples de tahrir effectués sur mib3, et sur la voyelle /a/ (figure (a), exemple sonore 14) et sur la voyelle /i/ (figure (b), exemple sonore 15).*

La figure 8.7 présente deux exemples de tahrir, effectués sur les voyelles /a/ et /i/. Les courbes de fréquence fondamentale et de quotient ouvert, associées aux spectrogrammes, permettent d'identifier aisément les ornements. Nous constatons sur ces deux figures que le tahrir se traduit par une diminution d'intensité sur /a/ et, à l'opposé, par un renforcement sur /i/. Cette observation peut être rapprochée de nos résultats concernant les limites supérieures des phonétogrammes : nous avons vu en partie 5 que la voyelle /a/ permettaient aux chanteurs d'obtenir des sons plus intenses en M1 qu'en M2, alors que cette tendance était annulée, voir inversée sur le /i/. Le tahrir pourrait être une illustration de ce résultat.

## 8.3 Bilan

Lors d'un changement de mécanisme (M1→M2 ou M2→M1), il se produit habituellement un saut de fréquence associé à une modification du timbre de la voix. Le saut de fréquence est lié, au niveau laryngé, à une modification de la surface de contact des cordes vocales, traduisant une modification subite de la masse vibrante, alors que les paramètres de contrôle musculaire (activités du thyro-aryténoïdien et du crico-thyroïdien) et aérodynamique (pression sous-glottique) restent constants ou varient lentement. Ces transitions sont modélisables à l'aide de modèles mécaniques non linéaires. L'amplitude du saut de fréquence lors de la transition M1→M2 a été étudiée à travers différents protocoles, parfois assez éloignés.

Ces transitions ont été diversement utilisées. Dans le chant lyrique, les sauts de fréquence ou les changements subits et incontrôlés du timbre vocal sont toujours évités. Nous souhaitons étudier le rôle la voyelle dans leur stratégie de masquage. La technique du yodel a été observée dans différentes cultures, elle utilise les transitions de mécanismes laryngés associées à des changements de voyelle bien précis. Les voyelles ouvertes sont utilisées en M1 et les voyelles fermées en M2. Nous souhaitons comprendre l'importance de ce changement de voyelle pour les transitions de mécanismes. La technique persane du tahrir utilise des courts emprunts en M2 au milieu d'une mélodie chantée en M1, comme appoggiature. Elle peut être effectuée sur toutes les voyelles, mais elle est plus difficile à produire sur les voyelles fermées, mais aussi plus recherchée.

# Chapitre 9

# Sauts de fréquence et hauteur fondamentale, intensité, voyelle

Ce chapitre présente l'influence de l'intensité, de la hauteur, de la voyelle sur les sauts de fréquence que nous observons lors des transitions de mécanisme laryngé. Nous avons choisi de restreindre l'étude à l'intervalle du saut de fréquence ainsi qu'à la fréquence de départ. Pour cela nous avons été amenés à enregistrer deux bases de données que nous présenterons en partie 9.1. Nous présenterons ensuite les résultats portant sur l'intervalle du saut (partie 9.2), puis ceux sur la fréquence de départ du saut (partie 9.3).

## 9.1 Constitution des bases de données

### 9.1.1 Intervalle du saut

Le protocole que nous allons maintenant décrire vise à étudier l'intervalle du saut en fonction de la hauteur, de l'intensité et de la voyelle. Son enregistrement et son dépouillement ont été partiellement effectués à l'occasion d'un mémoire de master (Albert, 2008).

Nous avons demandé à chaque chanteur sujet de produire des alternances de mécanismes laryngés en cherchant à rester sur la même note. Sur un son tenu, il est donc demandé au chanteur d'effectuer plusieurs transitions (idéalement au moins deux productions dans le sens M1→M2 et deux dans le sens M2→M1 par production).

Ces productions ont été effectuées dans la zone de recouvrement des mécanismes laryngés. Nous avons demandé aux chanteurs d'effectuer ces productions, dans un premier temps sur la voyelle /a/, et à une hauteur «confortable» pour ce type de production. Nous avons ensuite proposé aux chanteurs d'effectuer des productions similaires en descendant progressivement dans le grave (ton par ton, comme pour l'enregistrement des phonétogrammes), puis de même dans l'aigu. Sur chaque note, nous demandions aux chanteurs d'effectuer trois ou quatre niveaux d'intensité différents (selon les possibilités des chanteurs). Cet exercice était ensuite répété sur /i/, puis sur /o/ (un /o/ fermé comme pour la base de données de phonétogrammes).

Sept chanteurs ont participé à cette étude, il s'agit de S1, S3, S4, MS2, T3, Bar1, B3. Nous avons donc enregistré quatre femmes, supposées avoir une certaine maîtrise de la transition de mécanisme (dans la stratégie de masquage) et trois hommes (n'ayant pas de pratique du mécanisme M2, donc de la transition). Néanmoins si nous comparons le niveau d'expertise de ces chanteurs à celui de chanteurs de yodel maîtrisant parfaitement les intervalles des transitions de mécanisme, nous pouvons considérer que ces sept chanteurs ne sont pas entrainés pour la tâche qui leur a été demandée. Remarquons également que ces sept chanteurs avaient préalablement passé le protocole d'enregistrement des phonétogrammes.

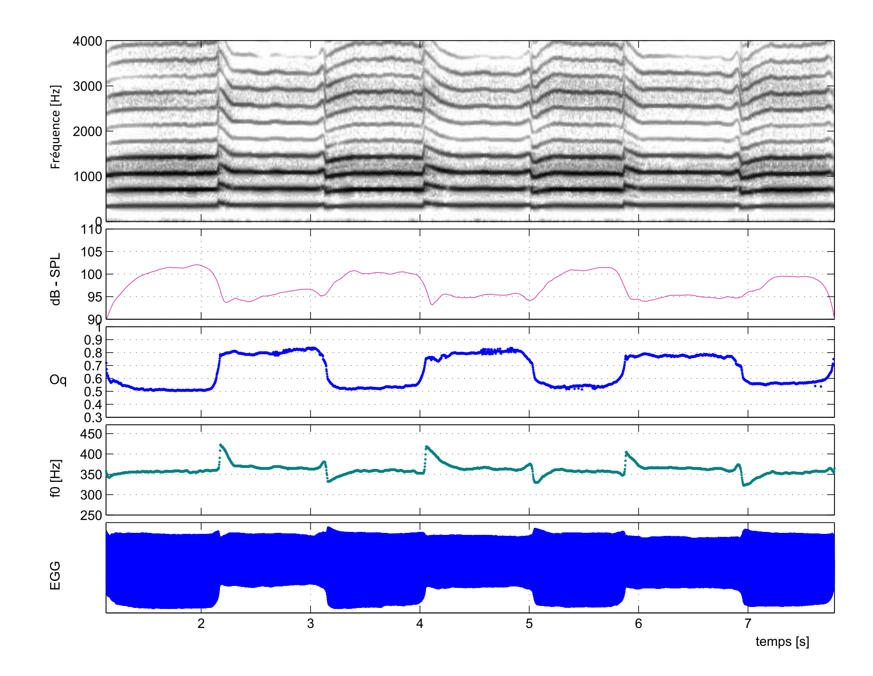



FIG. 9.1 – *Exemple de production demandée dans le protocole d'enregistrement. Le changement de mécanisme est attesté clairement par le changement d'amplitude du signal EGG ainsi que le changement de quotient ouvert. La transition de mécanisme est marquée par une perte de contrôle de la fréquence fondamentale. Chanteur : B3, fa#3, voyelle /a/ (exemple sonore 16).*

Le dispositif expérimental est identique à celui présenté en section 4.1 à propos de la base de données de phonétogrammes. Les calibrations ont également été effectuées de la même manière (voir section 4.4.1).

### 9.1.2 Étude de la fréquence de départ

Pour étudier l'influence de la voyelle sur la fréquence de départ du saut, nous avons demandé aux chanteurs d'effectuer des glissandi ascendants puis descendants, dont l'étendue est suffisamment large pour obliger les chanteurs à utiliser les deux mécanismes laryngés (M1 et M2). Le temps d'exécution du glissando (ascendant et descendant) devait être compris entre 5 et 10 secondes. Deux glissandi ont été effectués sur chaque voyelle étudiée (/a/, /i/ et /o/ fermé), soit en tout six glissandi par chanteur. Un exemple de production demandée a été présenté dans la partie 1.2.1 pour caractériser les mécanismes M1 et M2.

Ce protocole a été enregistré à la suite de celui portant sur les phonétogrammes (voir section 4). Il a donc été passé par les 21 chanteurs, et le dispositif expérimental est également le même, ainsi que les signaux enregistrés, les processus de calibration. Nous avons recueilli 151 glissandi exploitables en tout.

### 9.1.3 Traitement des données

Les descriptions ci-dessous portent essentiellement sur les productions de notes tenues. Les procédures de calcul de fréquences fondamentales et d'étiquetage des sauts sont décrits à partir de ce type de productions, mais ont été appliquées aux productions de glissandi.

#### Calcul de la fréquence fondamentale

Nous avons vu (section 8.1.1) que le saut de fréquence résultant de la transition de mécanisme était particulièrement rapide, de l'ordre de quelques cycles glottiques. Pour ces raisons, les algorithmes habituels d'estimation de fréquence fondamentale, basés sur l'estimation d'une fréquence moyenne sur une large fenêtre, ne permettent pas de décrire avec précision ces variations brutales que l'on observe lors des transitions de mécanismes laryngés. Pour remédier à

cette situation, nous avons :

– validé manuellement la détection des instants de fermeture glottique (GCI) à partir du signal DEGG aux voisinages des transitions de mécanisme laryngé ;
– calculé la fréquence fondamentale à partir des GCI, en moyennant puis en effectuant un filtrage médian d'ordre 5. Cette méthode s'est avérée la plus efficace pour établir une estimation de fréquence fondamentale précise et fiable, vu les caractéristiques des données à analyser.

**Étiquetage des sauts**

Les instants de début ($t_{dep}$) et de fin ($t_{arr}$) de sauts de fréquence ont été déterminés manuellement, à partir de la visualisation du spectrogramme du son rayonné, des courbes de fréquences fondamentales, de quotient ouvert ainsi que de l'enveloppe du signal EGG. Nous en avons ensuite déduit les paramètres de fréquence de déclenchement du saut ($f_{0dep}$), de fréquence d'arrivée après la phase de réajustement ($f_{0arr}$), ainsi que l'intervalle fréquentielle du saut $\Delta f_0$. La définition de l'ensemble de ces paramètres est schématisée figure 9.2. Outre ces paramètres, nous avons également évalué l'intensité avant le saut numéro k, comme étant l'intensité moyenne calculée entre l'instant de fin du k-1$^{\text{ième}}$ saut et l'instant de début du k$^{\text{ième}}$ saut, et de même pour l'intensité après le saut. Ainsi pour le saut numéro k,

$$Idb_{av}(k) = moyenne(Idb(t_{arr}(k-1) : t_{dep}(k)))$$

$$Idb_{ap}(k) = moyenne(Idb(t_{arr}(k) : t_{dep}(k+1)))$$

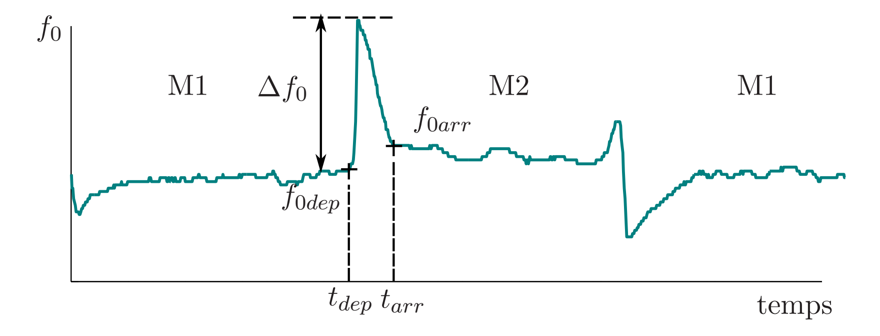



FIG. 9.2 – *Notations adoptées pour décrire les transitions de mécanisme laryngé.*

**Décorréler la hauteur et l'intensité : une estimation numérique de la nuance**

Nous avons vu dans le chapitre 5 que le phonétogramme permet de mettre en évidence une corrélation entre hauteur et intensité, corrélation dont nous nous sommes extraits en étudiant des coefficients de corrélation partielle. Nous avons cherché à adopter une méthodologie similaire pour étudier l'intervalle des sauts de fréquence. Pour cela nous avons défini une nouvelle échelle d'intensité, appelée $SPL_{cor}$, correspondant à une échelle d'intensité sonore indépendante de la hauteur. Ce paramètre est défini comme suit :

$$SPL_{cor} = SPL - k_v.\log(f_0)$$

où $k_v$ correspond à la correction à amener pour estimer le paramètre $SPL_{cor}$ à partir du SPL. Ce paramètre $k_v$ est le coefficient directeur de la droite de régression linéaire liant $\log(f_0)$ et le SPL pour l'ensemble des transitions effectuées sur une nuance donnée et sur une voyelle donnée. Nous l'avons estimé en mécanisme M1, pour chaque voyelle séparément et pour chaque nuance que le chanteur a produite, puis nous en avons calculé une moyenne sur les trois ou quatre nuances. $SPL_{cor}$ correspond donc à une échelle numérique exprimée en dB, dont les faibles valeurs correspondent aux pianissimi et les fortes valeurs au fortissimi.

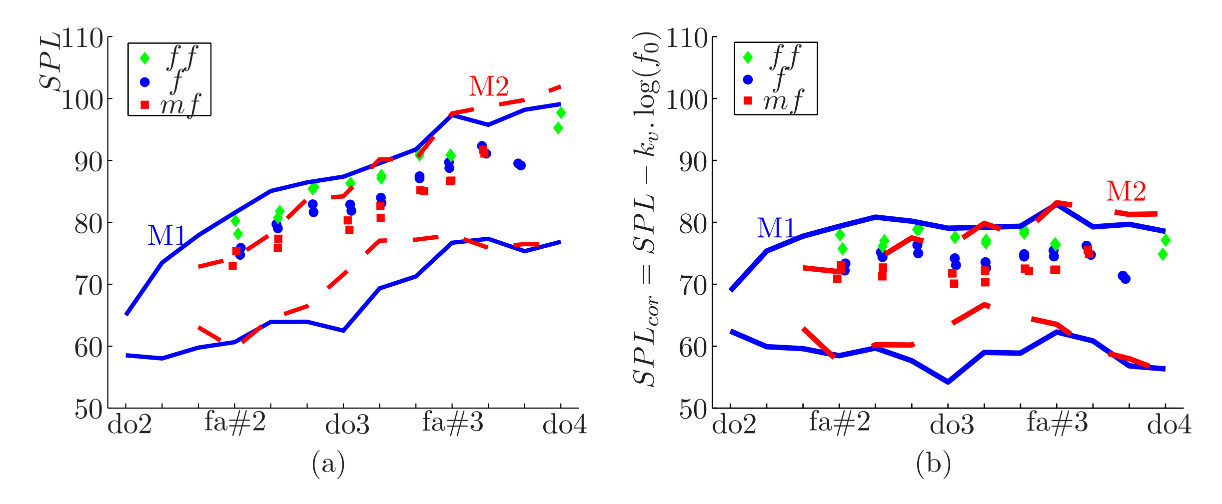



FIG. 9.3 – *Phonétogrammes de MS2, dans lesquels nous avons représenté par des points les positions de départ des transitions M1→M2. (a) : phonétogramme habituel (SPL en fonction de la hauteur). (b) : le SPL a été remplacé par $SPL_{cor}$, le paramètre numérique estimant la nuance du chanteur. Nous constatons que 78 dB correspond à une nuance fortissimo quelle que soit la hauteur, ce qui n'était pas le cas sur le diagramme (a). Voyelle utilisée : /i/.*

## 9.2 Étude de l'intervalle du saut

### 9.2.1 Résultats portant sur les notes tenues

Nous présentons dans cette partie les résultats de notre étude portant sur l'intervalle du saut dans un contexte contrôlé, c'est à dire en imposant l'intensité et la hauteur de départ (il s'agit donc du protocole de notes tenues).

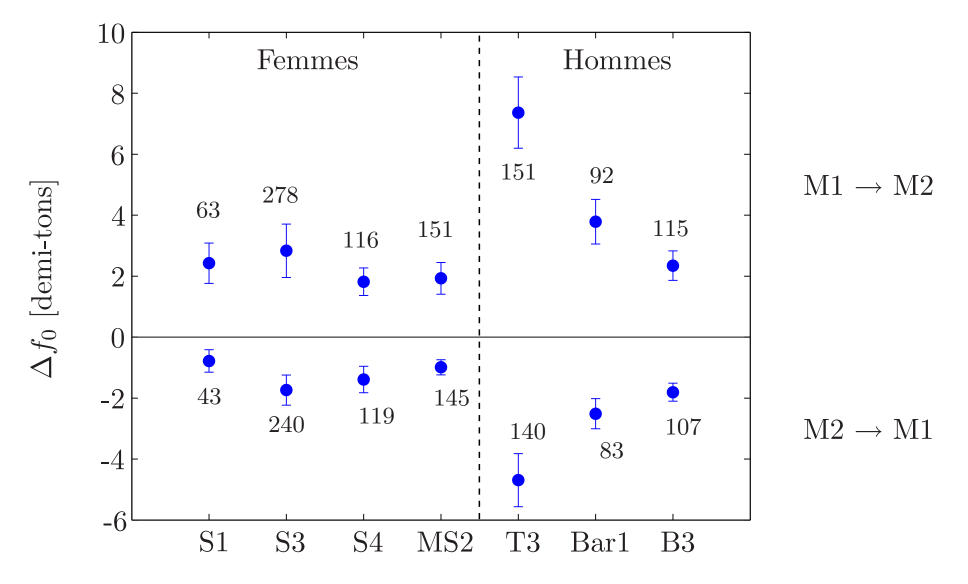



FIG. 9.4 – *Intervalles des sauts (moyennes et écarts types), exprimés en demi-tons, mesurés chez les 7 sujets, dans les sens M1→M2 et M2→M1, toutes voyelles confondues. Les numéros correspondent aux nombres de sauts effectués, pour chaque chanteur, dans le sens M1→M2 et dans le sens M2→M1.*

La figure 9.4 présente les intervalles moyens des sauts de fréquence mesurés sur l'ensemble de la base de données. Nous pouvons en tirer les éléments suivants :

Alors que T3 présente une valeur moyenne de plus de 7 demi-tons pour les transitions de M1 à M2, S4 n'a une valeur moyenne que de deux demi-tons. Il existe donc une variabilité importante entre les différents sujets quant à l'intervalle des sauts de fréquence. Globalement, la figure 9.4 montre que l'intervalle des sauts est plus grand chez les hommes que chez les femmes, dans le sens M1→M2 comme dans le sens M2→M1 (en valeur absolue). Ces observations (variabilité inter-

sujet et différences hommes-femmes) sont en accord avec celles menées par Svec *et al.* (1999) et Miller *et al.* (2002), effectuées respectivement sur deux hommes et une femme, et cinq hommes et six femmes (mais, dans les deux cas, avec un protocole d'enregistrement très différent). Elles corroborent également les résultats de Roubeau *et al.* (1989), obtenus cette fois-ci au moyen d'un protocole expérimental composé de notes tenues, comme celui que nous avons utilisé.

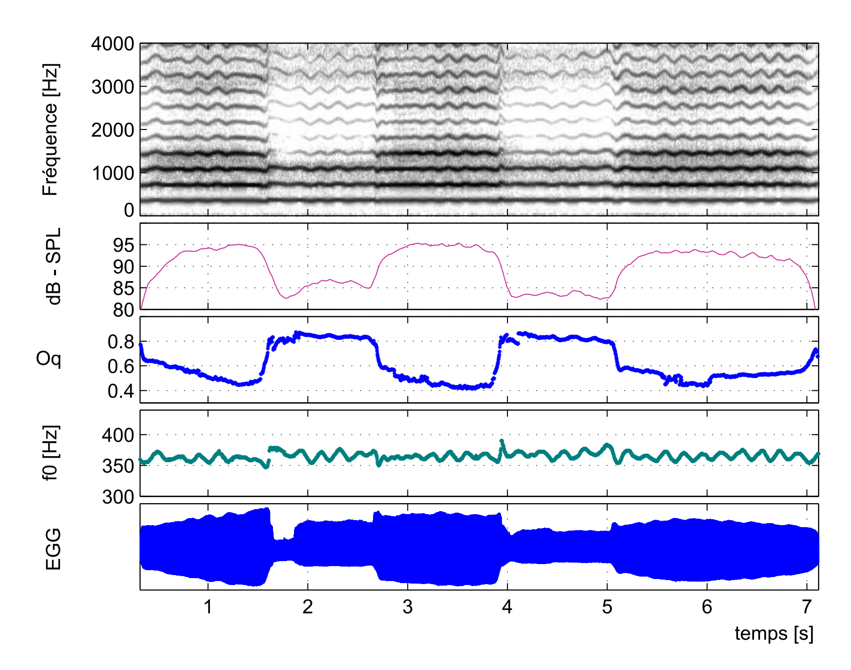



Fig. 9.5 – *Exemple de production de MS2. L'alternance de mécanisme laryngé est très bien marquée par la variation de l'amplitude du signal EGG et les variations de quotient ouvert. Néanmoins, les sauts de fréquence sont très faibles. Voyelle /a/, fa#3 (exemple sonore 17).*

Nous avons illustré en figure 9.5 un exemple de production vocale d'alternance de mécanismes laryngés avec des très faibles sauts de fréquences, voire pas de saut de fréquence du tout. Nous pouvons nettement constater ici une alternance du quotient ouvert entre 0.5 et 0.8 (environ) ainsi que des variations de l'enveloppe du signal EGG traduisant l'alternance de mécanismes laryngés imposée par le protocole. Néanmoins, nous constatons que les transitions de mécanismes laryngés ne sont marquées que par des sauts de fréquence de très faible intervalle (entre 1 et 2 demi-ton), voire par pas de saut détectable à l'oeil comme c'est le cas pour la dernière transition M2→M1 (vers t = 5 s), où la perte de contrôle de fréquence (1.30 demi-ton) est proche de l'amplitude du vibrato (0.74 demi-ton).

Nous pouvons également constater que pour chaque chanteur, les sauts effectués dans le sens M2→M1 sont plus petits que ceux effectués dans le sens M1→M2. Cette asymétrie a été peu décrite dans la littérature, du fait de l'utilisation de protocoles ne permettant pas de l'expliciter (Svec *et al.*, 1999; Miller *et al.*, 2002). Roubeau (1993) l'avait néanmoins déjà remarqué, ayant travaillé comme nous à partir de notes tenues. Lorsque le chanteur ne cherche pas à réajuster la fréquence fondamentale après la transition, il effectue une production de type «yodel», alternant entre une certaine note en mécanisme M1 et une autre en mécanisme M2. Cette situation ne permet naturellement pas de mettre en évidence une asymétrie en termes d'intervalle de saut en fonction du sens de la transition.

Nous allons maintenant étudier la variabilité de ces sauts de fréquence avec la hauteur de départ du saut, et l'intensité.

### Intensité et hauteur

Le tableau 9.1 présente les coefficients de corrélation partielle entre l'intervalle des sauts $\Delta f_0$ et la fréquence de départ $f_{0dep}$ ou l'intensité avant le saut $SPL_{av}$, pour les données correspondant à des transitions M1→M2.

| | /a/ | | /o/ | | /i/ | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| chanteur | $f_{0dep}$ | $SPL_{av}$ | $f_{0dep}$ | $SPL_{av}$ | $f_{0dep}$ | $SPL_{av}$ |
| S1 | -0.37 | 0.46 | -0.65 | -0.09 | -0.14 | -0.11 |
| S3 | 0.51 | -0.16 | -0.16 | 0.10 | -0.02 | 0.09 |
| S4 | -0.46 | **0.82** | -0.31 | 0.47 | -0.53 | 0.65 |
| MS2 | -0.30 | 0.62 | -0.60 | 0.67 | -0.47 | 0.42 |
| T3 | **-0.79** | **0.78** | **-0.81** | **0.85** | **-0.89** | **0.82** |
| Bar1 | -0.43 | **0.78** | -0.53 | **0.75** | **-0.78** | **0.89** |
| B3 | **-0.85** | **0.86** | -0.30 | 0.47 | **-0.92** | **0.92** |

TAB. 9.1 – *Coefficients de corrélation partielle entre l'intervalle des sauts $\Delta f_0$ (exprimée en demi-tons) correspondant à une transition* ***dans le sens M1→M2****, et $f_{0dep}$ ou $SPL_{av}$. Les résultats sont présentés pour les trois voyelles et les sept chanteurs séparément (Protocole des sons tenus).*

Les résultats présentés dans ce tableau 9.1 montrent que les coefficients de corrélation sont essentiellement négatifs quand ils se rapportent à $f_{0dep}$, et positifs pour $SPL_{av}$. Cela signifie que l'intervalle du saut de fréquence augmente avec l'intensité et diminue avec la fréquence de départ du saut.

Par ailleurs il est intéressant de constater que les corrélations fortes sont observées essentiellement chez les hommes.

Nous présentons en figure 9.6 les résultats présentant l'influence de la nuance sur l'intervalle du saut M1→M2 chez les sept chanteurs. Nous retrouvons, bien entendu, chez T3, Bar1, B3 ainsi que, dans une moindre mesure, chez MS2 et S4, une augmentation de l'intervalle du saut avec $SPL_{cor}$. Nous pouvons constater sur cette figure que cette augmentation dépend du chanteur. Ainsi Bar1 augmente-t-il son $\Delta f_0$ de 4 demi-tons en 12 dB, alors que S4 l'augmente de 2 demi-tons en 9 dB (soit 3.3 demi-tons par 10 dB dans le premier cas, contre 2.2 dB par 10 dB dans le deuxième).

| | /a/ | | /o/ | | /i/ | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| chanteur | $f_{0dep}$ | $SPL_{av}$ | $f_{0dep}$ | $SPL_{av}$ | $f_{0dep}$ | $SPL_{av}$ |
| S1 | -0.43 | 0.04 | -0.22 | -0.28 | 0.32 | -0.31 |
| S3 | -0.43 | 0.05 | -0.18 | 0.16 | -0.10 | 0.01 |
| S4 | -0.04 | -0.21 | 0.10 | -0.25 | 0.00 | -0.02 |
| MS2 | -0.00 | -0.48 | 0.22 | -0.22 | 0.11 | -0.19 |
| T3 | 0.00 | -0.20 | -0.15 | -0.19 | 0.31 | -0.54 |
| Bar1 | -0.18 | 0.06 | 0.10 | -0.37 | 0.32 | -0.43 |
| B3 | 0.31 | -0.36 | -0.02 | 0.05 | 0.55 | -0.52 |

TAB. 9.2 – *Coefficients de corrélation partielle entre l'intervalle des sauts $\Delta f_0$ (exprimée en demi-tons) mesurée avant et après une transition de mécanisme laryngé* ***dans le sens M2→M1****, et $f_{0dep}$ ou $SPL_{av}$. Les résultats sont présentés pour les trois voyelles et les sept chanteurs séparément.*

**Sens M2→M1**

Le tableau 9.2 présente les coefficients de corrélation partielle observés pour les transitions dans le sens M2→M1. Rappelons que les sauts dans ce sens sont de signe négatif, il faut donc inverser les signes des coefficients de corrélation partielle pour obtenir une description des corrélations entre $\Delta f_0$ en valeur absolue, et $f_{0dep}$ ou $SPL_{av}$.

Le résultat apparaissant le plus nettement à la vue de ces résultats est l'absence d'une tendance claire, comme nous l'avons observée dans le sens M1→M2. En effet nous n'observons pas de corrélation forte, et même les coefficients supérieurs à 0.5 (en valeur absolue) sont rares (il n'y en a aucun chez les femmes, et trois chez les hommes). Nous pouvons en déduire que

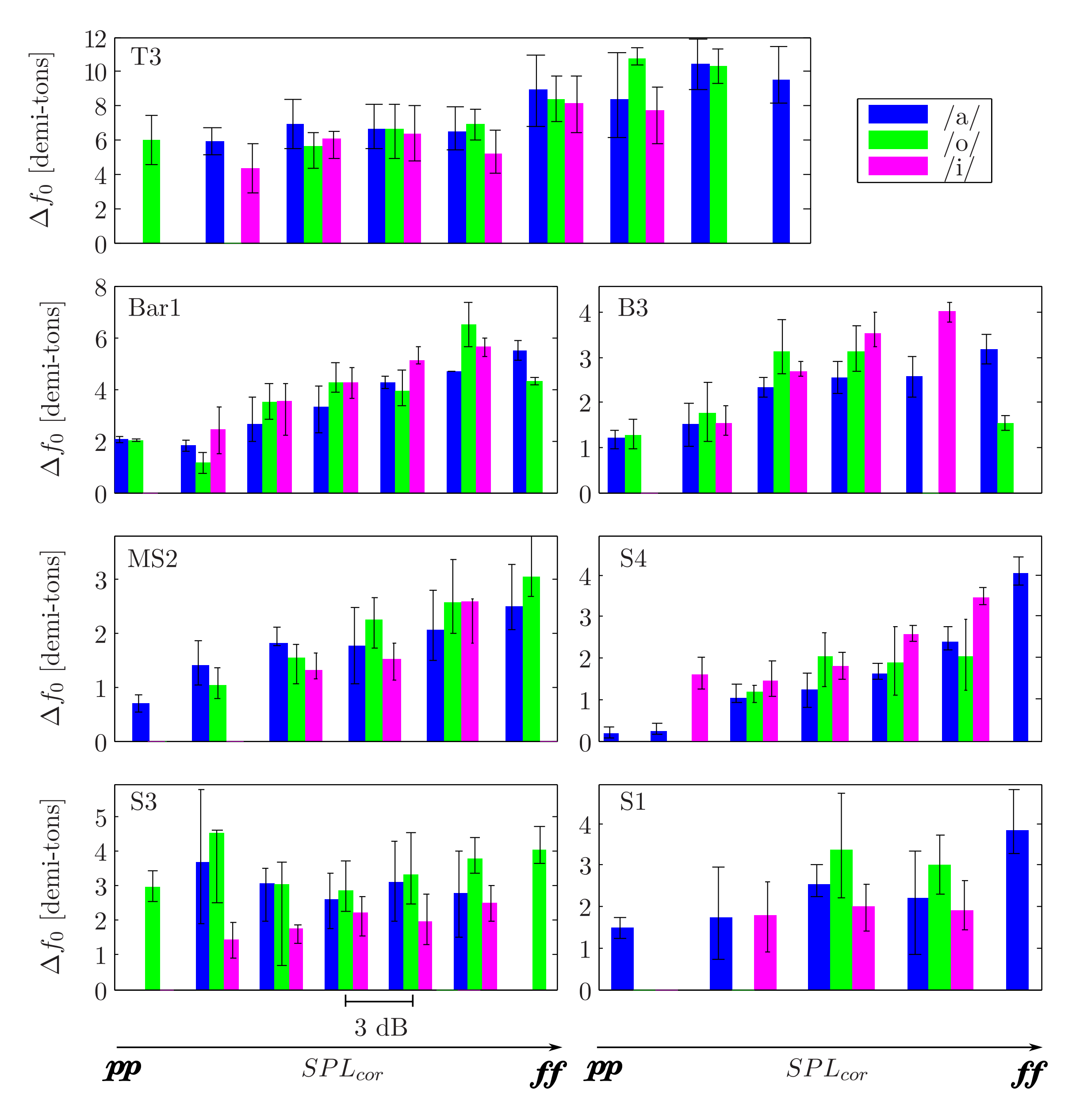



FIG. 9.6 – *Évolution de l'intervalle du saut en fonction de la nuance (estimée par le paramètre $SPL_{cor}$), dans le sens M1→M2, pour les trois voyelles et les sept sujets. Chaque groupement de bâtons est espacé de 3 dB en termes de $SPL_{cor}$.*

la transition M2→M1 n'est pas un simple phénomène inverse de la transition M1→M2, mais qu'elle a ses propriétés spécifiques.

**Influence de la voyelle sur l'intervalle du saut**

La figure 9.6 nous permet de visualiser l'influence de la voyelle sur l'intervalle du saut tout en tenant compte de l'influence de $SPL_{cor}$. Pour chaque chanteur, l'influence de $SPL_{cor}$ est similaire quelle que soit la voyelle utilisée. Nous pouvons donc considérer **l'influence de la voyelle comme étant un phénomène de deuxième ordre**, celle de la nuance étant de premier ordre.

Les résultats montrent également que **l'influence de la voyelle varie en fonction du chanteur**. Ainsi, chez T3, l'intervalle des sauts est plus faible sur la voyelle /i/ que sur /o/ (notamment dans la zone forte). S3 présente également des intervalles de sauts plus faibles sur /i/ que sur /a/ et /o/, alors que c'est sur /i/ que S4 obtient ses intervalles maximaux.

### 9.2.2 Intervalles des sauts et intensités de départ sur le protocole des glissandi

Nous avons calculé l'intervalle des sauts moyens, ainsi que l'intensité à laquelle étaient déclenchées les transitions. Ces résultats sont présentés dans les tableaux 9.3 et 9.4.

| | | /a/ | /i/ | /o/ |
|---|---|---|---|---|
| M1→M2 | Femmes | 2.58 ( 1.51 ) | 1.55 ( 1.14 ) | 2.5 ( 1.58 ) |
| | Hommes | 3.96 ( 2.07 ) | 3.1 ( 1.73 ) | 3.85 ( 2.3 ) |
| M2→M1 | Femmes | 3.1 ( 1.93 ) | 2.19 ( 1.08 ) | 1.9 ( 1.35 ) |
| | Hommes | 3.26 ( 2.16 ) | 3.52 ( 2.22 ) | 4.35 ( 2.86 ) |

Tab. 9.3 – $\Delta f_0$ *moyens (écarts types), exprimées en demi-tons, et mesurées chez les hommes et les femmes, pour les transitions de mécanismes se produisant pendant les glissandi, dans les deux sens.*

| | | /a/ | /i/ | /o/ |
|---|---|---|---|---|
| M1→M2 | Femmes | 87.5 ( 6.3 ) | 83.3 ( 4.4 ) | 85 ( 5.0 ) |
| | Hommes | 90.9 ( 8.7 ) | 85.1 ( 6.5 ) | 90.1 ( 7.7 ) |
| M2→M1 | Femmes | 86.6 ( 7.4 ) | 82.0 ( 3.1 ) | 84.5 ( 6.9 ) |
| | Hommes | 85.4 ( 8.6 ) | 82.3 ( 6.9 ) | 84.7 ( 8.2 ) |

Tab. 9.4 – $SPL_{dep}$ *moyennes (écarts types), exprimés en dB, et mesurés chez les hommes et les femmes, pour les transitions de mécanismes produites au cours des glissandi, dans les deux sens.*

Le tableau 9.3 montre que l'intervalle des sauts est un peu plus faible sur /i/ que sur /a/ et /o/, pour les hommes et les femmes, et dans les deux sens. Dans le même temps nous constatons sur le tableau 9.4 que l'intensité à laquelle le saut est déclenché est un peu plus faible sur /i/ que sur /a/ et /o/. Compte tenu de la corrélation que nous avons relevée dans la partie précédente entre la nuance et l'intervalle du saut, ce résultat est tout à fait cohérent. Nous observons néanmoins une tendance quant à l'influence de la voyelle sur l'intervalle du saut.

## 9.3 Étude de la fréquence de départ du saut

### 9.3.1 Zone phonétographique explorée avec les notes tenues

Nous allons maintenant présenter les étendues explorées par les chanteurs au cours de l'enregistrement en termes de hauteur et d'intensité.

La figure 9.7 présente des phonétogrammes de S3, T3 et B3, sur les voyelles /a/ et /i/, dans lesquels nous avons ajouté les positions de départ et d'arrivée (avant réajustement) des sauts

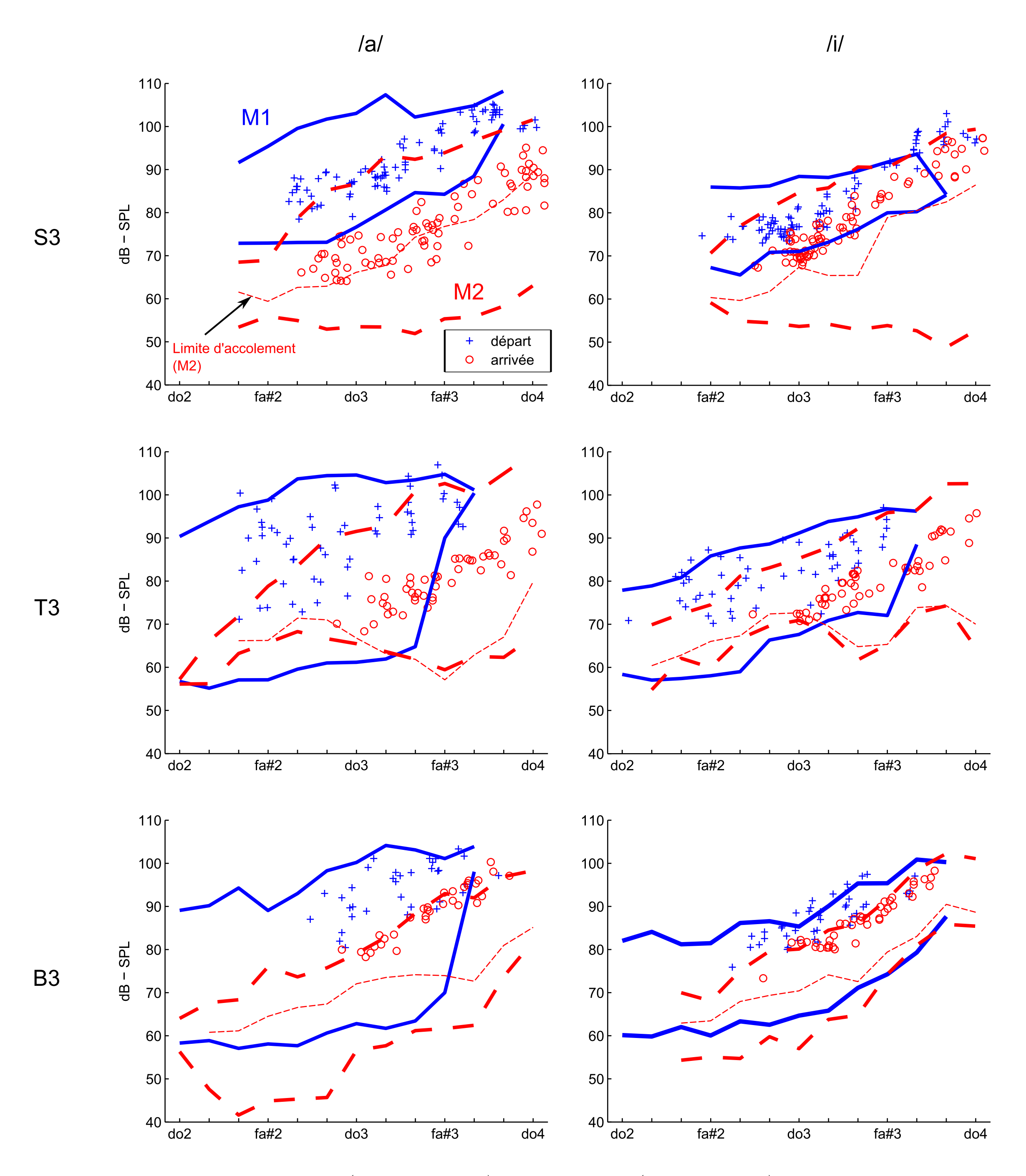



FIG. 9.7 – *Positions de départ ($f_{0dep}$,$SPL_{av}$) et d'arrivée ($f_{0ar}$,$SPL_{ap}$) des transitions de mécanismes laryngés dans le sens M1→M2, pour trois chanteurs, sur les voyelles /a/ et /i/.*

de fréquence observés lors des transitions M1→M2. Ces figures montrent que les positions de départ couvrent assez largement la zone de recouvrement pour S3 et T3 (sol#2 - do4 pour S3, mi2 - sol3 pour T3). En revanche les sauts exploités de B3 ne couvrent que la partie aigüe de la zone de recouvrement (sib2 - sol#3). Cette observation confirme la capacité de chanteurs même non-experts pour ce type de productions à effectuer des transitions de mécanismes sur une large étendue fréquentielle (supérieure à une octave chez S3 et T3).

La figure 9.7 présente également un intérêt quant aux intensités étudiées. Nous constatons que T3 a couvert une grande plage d'intensités en mécanisme M1, mais arrivait toujours dans une zone du phonétogramme de M2 assez restreinte. B3 a principalement exploré les régions correspondant à ses productions fortissimo dans un mécanisme comme dans l'autre. Ces observations peuvent permettre d'expliquer une partie de la variabilité inter-chanteur que nous avons observée dans la partie précédente.

Nous constatons également que la voyelle influence la variation d'intensité de part et d'autre de la transition. Cette variation est beaucoup plus faible sur /i/ que sur /o/ et /a/. Cette observation peut être mise en lien avec les phonétogrammes par mécanisme et par voyelle : nous avons observé que les phonétogrammes de M2 sont décalés vers le bas sur la voyelle /a/, mais pas sur /i/. Il est donc cohérent qu'il y ait une diminution d'intensité lors de la transition M1→M2 sur /a/, et pas sur /i/.

### 9.3.2 Fréquence de déclenchement des transitions dans les glissandi

Le protocole de notes tenues ne permet pas d'étudier l'influence de la voyelle, du sens de la transition sur fréquence de déclenchement de la transition. Nous allons maintenant étudier ce point à l'aide de la base de données constituée de glissandi.

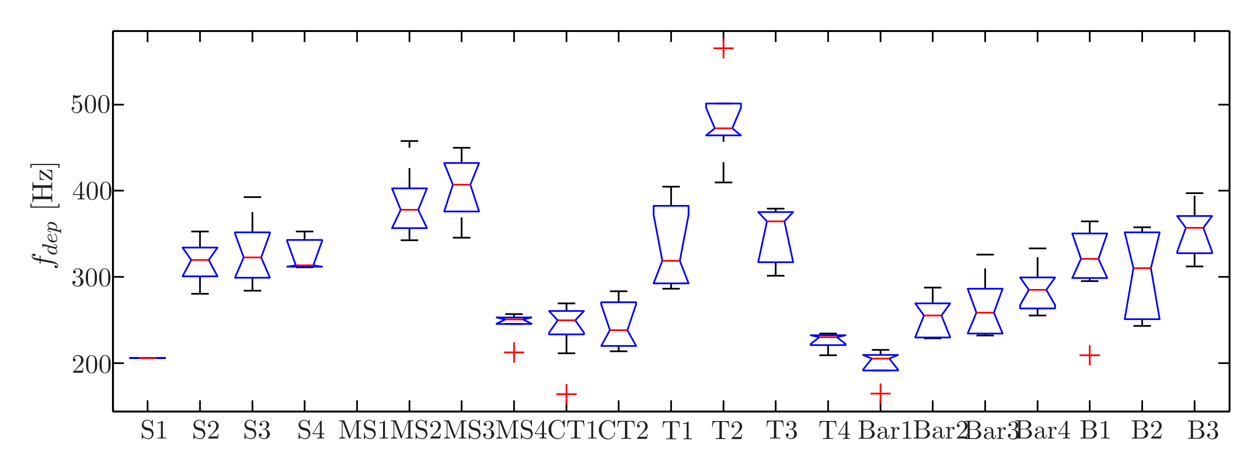



FIG. 9.8 – *Fréquence de déclenchement de la transition M1→M2 au cours des glissandi, toutes voyelles confondues, pour les 21 chanteurs.*

La figure 9.8 nous présente la fréquence moyenne de déclenchement du saut de fréquence pour les 21 chanteurs. Cette figure nous montre à nouveau la grande variabilité inter-chanteur quant à ce paramètre.

| | | /a/ | /i/ | /o/ |
|---|---|---|---|---|
| M1→M2 | Femmes | 339 ( 80 ) | 320 ( 44 ) | 335 ( 64 ) |
| | Hommes | 307 ( 77 ) | 275 ( 74 ) | 300 ( 74 ) |
| M2→M1 | Femmes | 355 ( 50 ) | 292 ( 34 ) | 345 ( 137 ) |
| | Hommes | 310 ( 114 ) | 282 ( 73 ) | 315 ( 99 ) |

TAB. 9.5 – $f_{0,dep}$ *moyens (écarts types) mesurés chez les hommes et les femmes (exprimés en Hz), pour les transitions de mécanismes se produisant pendant les glissandi, dans les deux sens.*

Nous présentons dans le tableau 9.5 les fréquences moyennes de déclenchement des transitions de mécanismes laryngés, dans les deux sens. Les résultats sont détaillés par voyelle. Nous

observons des écarts types allant de 34 Hz à 137 Hz. Ces écarts types traduisent l'importante variabilité inter-chanteurs que nous avons décrite à l'aide de la figure 9.8. Outre cette variabilité, nous constatons que, pour les hommes comme pour les femmes, la transition de mécanisme (dans le sens M1→M2 comme M2→M1) est effectuée à une fréquence sensiblement plus basse sur la voyelle /i/ que sur /a/ et /o/. Cette tendance n'est pas statistiquement significative du fait de la grande variabilité inter-chanteur, mais elle est vérifiée chez 12 des 21 chanteurs. En moyenne, la transition est effectuée 1.7 demi-tons plus grave sur la voyelle /i/ que sur la voyelle /a/ dans le sens M1→M2 comme M2→M1. La figure 9.9 donne une schématisation graphique de la fréquence fondamentale mesurée au cours de la production d'un glissando ascendant puis descendant, sur les voyelles /a/ et /i/.

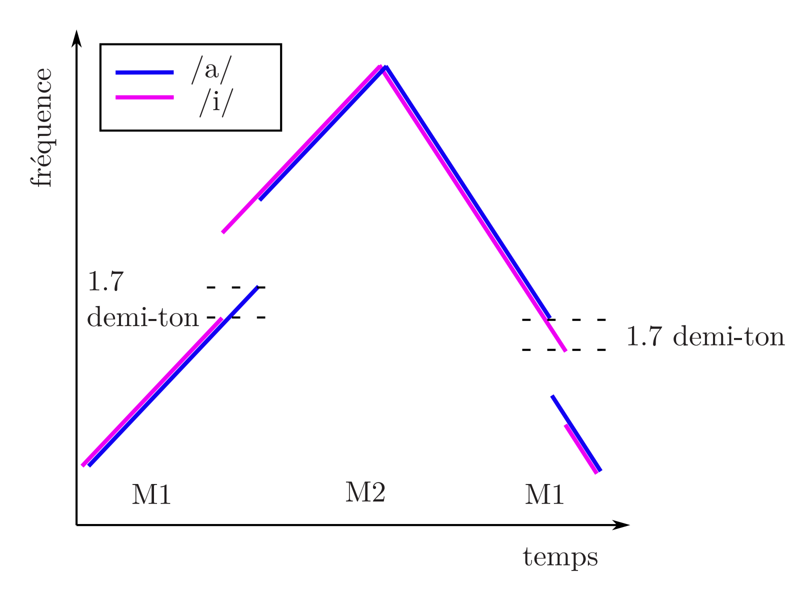



FIG. 9.9 – *Schématisation de glissandi effectués sur /a/ et /i/*

## 9.4 Discussion et conclusion

L'étude des notes tenues confirme qu'il est possible de maîtriser (dans une certaine mesure) la hauteur et l'intensité à laquelle la transition doit être effectuée. Ce résultat n'est pas surprenant dans la mesure où ce type de maîtrise de l'instrument vocal est abondamment utilisé dans les techniques de chant utilisant les transitions de mécanisme (nous avons notamment cité le yodel et le tahrir).

**Influence de la hauteur et de $SPL_{cor}$ sur l'intervalle du saut**

L'intervalle du saut de fréquence et $SPL_{cor}$ sont corrélés positivement dans le sens M1→M2. Ce résultat nous permet de généraliser celui de Roubeau (1993), obtenu avec un sujet féminin effectuant des transitions sur des notes tenues sur une hauteur et quatre intensités différentes. Nous avons constaté que cette corrélation était beaucoup moins marquée dans le sens M2→M1, où le saut correspondrait alors à une augmentation de masse vibrante par «recouplage» des différentes couches. L'intervalle du saut est également inversement corrélé à la hauteur dans le sens M1→M2, généralisant là aussi les observations de Roubeau (1993) (un sujet aussi) ou celles de Svec et collaborateurs (Svec et Pesak, 1994; Svec *et al.*, 1999). Cette tendance est, là aussi, très peu marquée dans le sens M2→M1.

Toutes choses égales, l'intensité vocale est corrélée à la pression sous-glottique. Compte tenu de la durée stricte du saut de fréquence (hors réajustement fréquentiel), le chanteur n'a pas le temps de modifier sa pression sous glottique. Les fréquences de départ et d'arrivée d'une transition de mécanisme correspondent donc à deux états glottiques produits avec la même pression sous-glottique. Or à hauteur donnée, la pression sous-glottique est plus faible en M2 qu'en M1 (Sundberg et Högset, 2001). L'augmentation de l'intervalle du saut avec $SPL_{cor}$

pourrait être dû à une différence de contrôle de la hauteur et de l'intensité à partir de la pression sous-glottique en M1 et en M2. Il est difficile d'être plus précis dans la mesure où le contrôle de la pression sous-glottique en M2 a été peu étudié.

**Influence de la voyelle sur l'intervalle du saut et sur la fréquence de déclenchement**
L'influence de la voyelle a parfois été mentionnée de façon anecdotique (Svec *et al.*, 1999), mais à notre connaissance, jamais étudiée explicitement. Nous avons vu que la voyelle pouvait avoir une influence sur l'intervalle du saut, mais que cette influence dépendait du chanteur. Nous proposons deux hypothèses pour expliquer ce résultat :

– les voyelles ne seraient pas formées exactement de la même façon par les différents chanteurs. Il y aurait donc bien une influence de la voyelle sur l'intervalle du saut, et la variété des résultats découlerait de la variété de formation des voyelles en fonction du chanteur.
– face à la nécessité de vocaliser aigu en mécanisme M1 ou grave en mécanisme M2 (ce qui correspond, dans les deux cas, à la zone fréquentielle de recouvrement des mécanismes), le chanteur effectue des ajustements laryngés lui permettant de maintenir la voyelle. Ces ajustements dépendraient de la voyelle, et seraient le résultat de l'entrainement vocal. Ils seraient donc susceptibles de varier légèrement en fonction des chanteurs, impliquant une influence différente de la voyelle sur le saut de fréquence.

Nous avons par ailleurs constaté que la voyelle influençait légèrement la fréquence de déclenchement de la transition (dans la situation non contrôlée). Il est intéressant de noter que la fréquence de déclenchement de la transition est abaissée sur la voyelle /i/, dont le premier formant est situé à une fréquence très proche de celle des sauts. Titze (2008) décrit cette situation comme étant très favorable à la vibration glottique si F1 est situé juste au dessus de la fréquence fondamentale, et très défavorable si la fréquence fondamentale (ou un autre harmonique) passe juste au dessus de F1. Ce phénomène d'interaction source-filtre pourrait expliquer pourquoi nous observons des transitions légèrement plus basses sur /i/ que sur /a/ et /o/. La vibration glottique étant dans une région (en termes d'activité musculaire) relativement difficile à stabiliser, la perturbation acoustique pourrait être le phénomène favorisant la transition.

**Transitions de mécanisme et pratiques vocales**
L'intervalle des sauts est plus petit à faible intensité, ce qui explique en partie pourquoi les **chanteurs lyriques** cherchent à diminuer l'intensité au moment de changer de mécanisme pour masquer la transition. Nous n'avons pas observé d'influence de la voyelle sur l'intervalle du saut. Il serait intéressant de confronter ce résultat avec la pratique du chant.

Concernant l'utilisation des voyelles dans le **yodel**, notre travail sur les phonétogrammes permet déjà de proposer une interprétation : l'utilisation des voyelles ouvertes en M1 et des voyelles fermées en M2 permet de produire les sons dans les deux mécanismes à une intensité proche. Le jeu des voyelles permet également d'accentuer le contraste entre les mécanismes M1 et M2.

Nous avons observé que la voyelle influence peu l'amplitude des sauts. Il est possible que l'ajustement des fréquences vocaliques avant et après le saut permette au chanteur, une fois la phase purement mécanique du saut de fréquence effectuée, d'ajuster en un temps très bref la fréquence fondamentale sur la note visée. Une étude complémentaires des enregistrements de yodel pourrait valider ou non cette hypothèse. Une autre possibilité est celle d'une action mécanique du changement de voyelle sur le larynx (via l'os hyoïde).

Le geste vocal permettant de chanter du **tahrir** est encore inexpliqué au niveau physiologique. Néanmoins notre étude permet d'observer que la voyelle n'est pas utilisée pour contrôler l'amplitude du saut de fréquence. La virtuosité des chanteurs de tahrir réside plus dans le contrôle fin des paramètres laryngés pour effectuer une phase de M2 la plus courte possible, et compte tenu de la brièveté de l'ornement, il est probable qu'il n'y ait pas de phase de réajustement de fréquence lors des transitions M1→M2. Pour expliquer cette brièveté de la phase de M2, nous

pouvons proposer comme hypothèse que les chanteurs de tahrir ne modifient pas leur pression sous-glottique entre le M1 et le M2, mais l'activité de certains muscles laryngés pour passer en mécanisme M2. Dans le cadre de cette hypothèse, l'étude des voyelles que nous avons présentée partie 8.2.3 montrerait qu'une pression sous-glottique donnée produit un son plus aigu et plus faible en M2 qu'en M1 sur la voyelle /a/, mais un son plus aigu et plus fort en M2 qu'en M1 sur le /i/. Cette différence est liée à la différence de pression sous-glottique nécessaire pour produire une intensité donnée sur /a/ et sur /i/ en mécanisme M1 (ce dont nous avons discuté en section 6.3 à partir des mesures de quotient ouvert).

## 9.5 Bilan

Pour étudier l'influence de la hauteur, de l'intensité, du sens de la transition et de la voyelle sur l'intervalle du saut de fréquence, nous avons mis en place deux protocoles:

- l'un consistant en des notes tenues avec alternance de mécanisme, sur différentes notes, intensités et voyelles.
- un autre de glissandi ascendants et descendants sur différentes voyelles.

La variabilité inter-sujet de l'intervalle des sauts de fréquence est très importante. Globalement, nous avons obtenu des intervalles de sauts plus grands chez les hommes que chez les femmes. Pour ces dernière, la transition M2→M1 est parfois effectuée sans aucun saut de fréquence.

Dans le sens M1→M2, l'intervalle du saut:

- augmente avec $SPL_{cor}$, une estimation numérique de la nuance.
- a tendance à diminuer avec la hauteur.
- peut varier en fonction de la voyelle, mais il s'agit alors de stratégies individuelles

Dans le sens M2→M1, nous n'avons dégagé de tendance quand à la variation de l'intervalle du saut ni avec la hauteur, ni avec l'intensité ni avec la voyelle.

Lorsque la transition est effectuée à une fréquence non contrôlée (au cours de glissandi), elle a lieu en moyenne 1.7 demi-tons plus bas sur /i/ que sur /a/ dans les deux sens. Ce résultat est corrélé à la fréquence du premier formant, qui dans le cas du /i/, est très proche de la fréquence fondamentale au moment de la transition.

La voyelle aurait donc tendance à modifier la fréquence de déclenchement passif de la transition, mais son influence sur l'intervalle du saut reste propre à chaque individu.

# Conclusion générale

Notre problématique est issue de la communauté des chanteurs, et nous l'avons décrite en termes d'influence de la voyelle en mécanismes M1 et M2. Nous avons orienté nos investigations sur les phonétogrammes, plusieurs paramètres glottiques et spectraux, et sur les transitions de mécanisme laryngé.

## Bilan général

Pour mieux comprendre quelles associations les chanteurs effectuent entre mécanismes laryngés et voyelles, nous avons étudié plusieurs traités de chants. La question est très peu traitée de façon explicite, ce qui montre qu'elle n'a pas été conceptualisée ou explicitée par les auteurs des ouvrages que nous avons étudiés. 16 chanteurs ont accepté de remplir un questionnaire portant sur leur perception des mécanismes laryngés et sur les relations entre voyelles et mécanismes laryngés. Parmi ces chanteurs, un consensus a pu être établi dans l'association des voyelles ouvertes ou du /a/ au mécanisme M1 et des voyelles fermées ou du /i/ au mécanisme M2 à travers le vocabulaire de la facilité d'émission ; les mécanismes laryngés étant perçus essentiellement à travers des sensations vibratoires globales, des sensations musculaires laryngées ou des sensations auditives. Au cours de l'entretien qu'il nous a accordé, R. Expert, chanteur et professeur de chant, nous a réaffirmé la pertinence de ces associations entre voyelles et mécanismes laryngés dans sa pédagogie et sa pratique vocale.

Nous avons développé l'ensemble de notre étude pour chercher des corrélats à ces observations effectuées dans le domaine du chant lyrique.

**L'étude phonétographique**

Nous avons cherché à comparer l'influence de la voyelle sur la dynamique vocale des chanteurs en M1 et en M2. Pour cela nous avons enregistré 21 chanteurs. La prise en compte des mécanismes laryngés au niveau du protocole d'enregistrement nous a permis d'établir que la limite supérieure des phonétogrammes est en moyenne de 10 dB supérieure sur la voyelle /a/ que sur /i/ en mécanisme M1, la limite sur la voyelle /o/ occupant une position intermédiaire; alors qu'en mécanisme M2, aucune différence de limite supérieure n'a été observée en relation avec les voyelles. La variété des phonétogrammes par voyelle observée dans la littérature est donc expliquée par la différence d'influence des voyelles sur les limites phonétographiques en M1 et en M2, indépendamment de l'entrainement vocal ou du sexe des chanteurs.

Il est intéressant de mettre ce résultat en relation avec nos mesures de quotient ouvert. À hauteur et intensité fixées, nous avons observé une différence de quotient ouvert en M1 entre les voyelles /a/ et /i/, mais pas en M2. Ce résultat peut être expliqué par le fait que le quotient ouvert est inversement corrélé à la pression sous-glottique en M1, et qu'une pression donnée permet de produire un /i/ moins fort qu'un /a/. Les limites supérieures des phonétogrammes pourraient correspondre à des configurations de pressions sous-glottiques maximales, quelle que soit la voyelle (donc de même pression sous-glottique sur /a/ et sur /i/, à hauteur donnée). Nous avons constaté par l'emploi d'une simulation basée sur l'utilisation du modèle LF que la différence de quotient ouvert observée entre les mécanismes M1 et M2 permettait d'expliquer une large part de la différence d'influence de la voyelle sur les limites supérieures de phonétogrammes de M1 et de M2.

Par rapport au témoignage des chanteurs, notre étude apporte des éléments qu'il est intéressant de souligner : d'abord, la dynamique vocale est plus faible sur /i/ que sur /a/ en mécanisme M1, ce qui pourrait être une des explications de l'association du /a/ au mécanisme M1 effectué par les chanteurs. D'autre part, la considération selon laquelle le mécanisme M2 correspond à des sons moins forts (à hauteur donnée) s'est bien répandue dans la communauté scientifique du fait (entre autres) que les phonétogrammes sont habituellement effectués sur la voyelle /a/. Or cette considération est fausse sur la voyelle /i/, puisque nous avons observé qu'à partir du do2 environ, la limite supérieure des phonétogrammes de /i/ était plus intense en M2 qu'en M1. Nous pouvons donc remarquer que comparativement à la voyelle /a/, la voyelle /i/ permet d'émettre des sons plus forts en mécanisme M2 qu'en M1. Nous observons là un second aspect qui corrobore le discours des chanteurs.

Par rapport aux nombreuses études phonétographiques disponibles dans la littérature, l'observation précédente montre également que la méthode d'identification des mécanismes laryngés à partir de la baisse d'intensité de la limite supérieure n'est applicable, dans le meilleur cas, qu'aux phonétogrammes enregistrés sur la voyelle /a/. Elle n'est pas valide sur les phonétogrammes de /o/ (et peut même être attribuée à tort à des changements d'alignements entre harmoniques et formants) ni de /i/. La pente de la limite supérieure des phonétogrammes ne varie pas selon la voyelle. Nous avons observé des pentes phonétographiques variant avec le mécanisme laryngé. Ce résultat ne peut pas être généralisé à l'ensemble du phonétogramme dans la mesure où nous n'avons enregistré que des phonétogrammes partiels (restreints à la tessiture do2-do4).

Nous avons par ailleurs explicité la présence d'une large zone phonétographique produite sans accolement glottique détecté par l'EGG. Cette zone correspond à des émissions pianissimo. Elle est détectable sur le signal EGG par une amplitude très faible, et sur sa dérivée par l'absence de pics d'ouverture et de fermeture. Cette zone phonétographique est particulièrement étendue chez les soprani, et correspond à des productions que ces chanteuses sont susceptibles d'utiliser pour chanter (donc dont la qualité vocale est acceptable, selon des critères non explicités ici et appartenant au domaine de la technique vocale lyrique). La prise en compte ou non de cette zone lors de l'enregistrement d'un phonétogramme influence fortement la détermination de la limite inférieure, et explique donc une partie de la variabilité des résultats décrits dans la littérature par rapport à cette limite inférieure. Elle influence également fortement le calcul de l'aire phonétographique.

Nous avons également étudié des phonétogrammes d'amplitude de l'EGG (indice de la surface de contact des cordes vocales) et de position verticale du larynx (VLP). Nous avons observé que l'amplitude de l'EGG est fortement positivement corrélée à l'intensité en mécanisme M2, et également dans une moindre mesure (plutôt chez les femmes que chez les hommes) en mécanisme M1, sur les trois voyelles étudiées. Nous avons vérifié que l'amplitude de l'EGG est plus faible en M2 qu'en M1 à hauteur et intensité fixées, ce résultat traduisant la plus faible surface de contact des cordes vocales en M2 qu'en M1.

Les résultats concernant l'influence de la voyelle sur l'amplitude de l'EGG dépendent beaucoup du chanteur. La tendance observée est qu'elle est un peu plus grande sur /i/ que sur /a/ en M1, et dans une moindre mesure en M2. La voyelle /i/ favoriserait donc le contact glottique. Nous avons observé que la position verticale du larynx ne variait pas selon des tendances partagées par l'ensemble des chanteurs en fonction de la hauteur ou de l'intensité, bien qu'il existe des stratégies personnelles. Nous notons que les chanteurs de M1 abaissent plus leur larynx en M1 qu'en M2 et inversement pour les chanteurs de M2, ce qui confirme que la position du larynx est fortement liée à la technique vocale. Par rapport aux voyelles, nous avons constaté que les chanteurs ont tendance à avoir un larynx plus haut sur /i/ que sur /a/ en M1, et inversement en M2, pour les chanteurs de M2 seulement. La tendance observée en mécanisme M1 est conforme aux études menées (essentiellement en parole), et pourrait être liée à la position de la langue. L'observation du mécanisme M2 reste à expliquer, nous constatons quoi qu'il en soit qu'il y a un aspect d'entrainement vocal important à prendre en compte.

**L'étude spectrale**

Pour étudier la répartition de l'énergie dans le spectre, nous avons défini trois bandes de fréquences, puis nous avons étudié le rapport d'énergie de deux de ces trois bandes par rapport à l'énergie totale. Pour les hommes, FB1 va de 0 à 2 kHz, FB2 de 2 à 4.5 kHz, et FB3 de 4.5 à 10 kHz. Pour les femmes, FB1 va de 0 à 2.4 kHz, FB2 de 2.4 à 5.4 kHz, FB3 de 5.4 à 12 kHz. De la sorte, FB2 comprend le formant du chanteur et FB3 les hautes fréquences.

L'énergie du formant du chanteur est plus grande sur /i/ que sur /o/ et /a/, à hauteur et intensité données. Le rapport d'énergie dans FB2 avec l'énergie totale (ER(FB2)) adopte des profils de variation avec le SPL très diverses, en fonction des chanteurs, de la hauteur, de la voyelle, et du mécanisme laryngé. Dans de nombreux cas, il présente une saturation au cours de laquelle ce rapport n'augmente plus avec le SPL. Sur /a/, cette saturation a été observée en mécanisme M1 chez les chanteurs professionnels et dans la tessiture qu'ils utilisent le plus communément. Sur /i/, nous l'avons observée chez tous les chanteurs en M1 et chez les chanteurs professionnels de mécanisme M2 (contre-ténors, voix de femmes) en M2. Par ailleurs, les chanteurs de mécanisme M1 ont un formant du chanteur plus ample en M1 qu'en M2, alors que les chanteurs utilisant les deux mécanismes sont capables de l'égaliser. Le formant du chanteur n'est donc pas développé de la même façon en fonction de la tessiture abordée par le chanteur et de sa pratique des mécanismes.

Le rapport de l'énergie dans FB3 avec le SPL varie avec la hauteur, mais les profils de variation de ce paramètre avec le SPL sont très variés. À hauteur et intensité données, il est plus faible en M2 qu'en M1. Globalement il est plus grand sur /i/ que sur /a/, suivant la même évolution que le rapport d'énergie de FB2 avec le SPL.

**L'étude des transitions de mécanisme laryngé**

Nous avons observé différentes utilisations musicales des transitions de mécanisme laryngé. Les chanteurs lyriques travaillent pour la masquer, dans d'autres cultures elles sont utilisées comme ornement. La maitrise du yodel nécessite un contrôle fin de l'amplitude du saut, et utilise les voyelles pour marquer le contraste et peut-être faciliter la transition entre les deux mécanismes. Les voyelles utilisées en M1 sont les voyelles ouvertes et celle en M2 les voyelles fermées, ce qui correspond aux associations effectuées par les chanteurs lyriques entre mécanismes et voyelles, confirmant l'existence d'une relation entre mécanismes et voyelles.

Nous avons souhaité déterminer si la voyelle avait une influence sur l'intervalle du saut. Pour cela nous avons mis en place deux protocoles, l'un basé sur des notes tenues avec alternances de mécanismes, l'autre sur des glissandi avec changement de mécanisme. Le premier protocole nous a permis d'établir que l'intervalle des sauts dépend fortement du chanteur. Cet intervalle est globalement plus faible pour les femmes, et peut même approcher zéro demi-tons, notamment dans le cas des transitions M2→M1. L'intervalle du saut est très fortement positivement corrélé à l'intensité (quant elle est décorrélée de la hauteur), et inversement corrélé à la hauteur dans le sens M1→M2 pour les hommes. Une tendance similaire, mais moins forte, est observée chez les femmes. Dans le sens M2→M1 nous n'avons observé aucune tendance. La voyelle semble avoir une influence sur l'intervalle des sauts chez certains chanteurs, mais cette influence n'est pas la même chez tous les chanteurs. Effectuée lors de glissandi, la transition de mécanisme est déclenchée un peu plus bas (1.7 demi-ton en moyenne) sur la voyelle /i/ que sur la voyelle /a/, dans les sens M1→M2 et M2→M1. La position basse du premier formant sur le /i/ pourrait être responsable du déclenchement de la transition de mécanisme.

## Discussion : quelle relation entre voyelles et mécanismes ?

L'étude phonétographique a clairement montré que la dynamique vocale était plus grande sur /a/ que sur /i/ en M1, et que comparativement au /a/, la voyelle /i/ permettait une plus grande dynamique en M2 qu'en M1. La dynamique vocale peut donc être un paramètre sur lequel se basent les chanteurs pour effectuer leurs associations entre mécanismes laryngés et voyelles. La différence de dynamique est liée au fait qu'une pression sous-glottique donnée permet d'émettre

un son plus fort sur /a/ que sur /i/ en mécanisme M1 (voir la discussion de la section 6.3). De plus la voyelle /i/ est associée à une surface de contact glottique plus importante que /a/, ce que les chanteurs pourraient être amenés à contrebalancer par une augmentation de la pression sous-glottique pour retrouver un équilibre vocal (accord pneumo-phono-résonantiel). L'émission de la voyelle /i/ serait donc plus difficile, dans le sens où elle demande un investissement corporel plus important que la voyelle /a/, en mécanisme M1, à hauteur et intensité fixées. À cela, nous pouvons encore ajouter le fait que la voyelle /i/, de par la position haute de la langue qu'elle nécessite, tend à faire monter le larynx, ce qui s'oppose à la technique vocale lyrique tendant à maintenir le larynx bas dans la partie aigüe du mécanisme M1.

Un des éléments nous permettant peut être de comprendre le témoignage des chanteurs tient au fait que dans la tessiture étudiée, donc dans la zone de recouvrement des mécanismes, le mécanisme M1 est émis avec des niveaux de pressions sous-glottiques très grands, et probablement des contractions musculaires au niveau laryngé très importantes, par rapport au mécanisme M2. Cela tient au fait que la tessiture étudiée porte sur l'aigu du mécanisme M1 et le grave du mécanisme M2. La problématique pour chanter dans cette tessiture n'est donc pas du tout la même, selon que le chanteur utilise le M1 ou le M2. En mécanisme M2 globalement, le chanteur se doit d'entretenir une vibration laryngée, et de timbrer le son. Pour cela la voyelle /i/ semble préférable à la voyelle /a/ en mécanisme M2 : s'il est effectif que le /i/ favorise la vibration glottique, alors cette voyelle permettra de descendre plus facilement ou avec un meilleur accolement glottique que la voyelle /a/, en mécanisme M2. Nous avons d'ailleurs constaté que l'amplitude du formant du chanteur, plus grande sur /i/ que sur /a/, permet au chanteur d'avoir un timbre plus riche sur /i/ que sur /a/.

L'étude des transitions de mécanisme a montré que la voyelle influençait peu l'intervalle du saut de fréquence, et que la transition de mécanisme est effectuée plus bas sur /i/ que sur /a/. Lors du glissando ascendant, en mécanisme M1, le chanteur mène sa voix dans une région où (si il ne fait pas appel à une technique particulière pour maintenir le mécanisme M1) elle est de moins en moins stable. Maintenir le mécanisme M1 relève donc d'une gestion de plus en plus fine et de plus en plus sujette à toute perturbation. La présence du premier formant proche de la fréquence fondamentale peut alors provoquer la transition laryngée d'un système peu stable vers une configuration plus stable, à savoir le mécanisme M2. Il apparait que, de par la fréquence du premier formant, le /i/ favorise une plus grande stabilisation du mécanisme M2 que le /a/. Cette plus grande stabilisation pourrait s'expliquer par les arguments que nous avons développés dans le paragraphe précédent.

**Avons-nous observé des interactions source-filtre ?**

Comme nous venons de le discuter, la voyelle a une influence sur la production vocale globale, que le chanteur corrige si nécessaire, par exemple en augmentant un peu la pression sous-glottique sur /i/ par rapport au /a/, en mécanisme M1 notamment. Néanmoins cet aspect précis ne remet pas directement en cause l'hypothèse d'indépendance de la source et du filtre dans la mesure où l'intensité est un paramètre de sortie du système et non un paramètre d'entrée.

Le concept d'interaction source-filtre est issu des modèles de production vocale et non de l'expérimentation. Sur le plan conceptuel, nous pouvons envisager différents types d'interactions.

La première catégorie regrouperait les interactions purement acoustiques : dans ce cadre, le filtre a une influence sur l'onde de débit glottique seule, ou sur l'ODG et la vibration glottique elle-même. C'est vraisemblablement le type d'interaction observé avec les transitions de mécanismes effectuées sur les glissandi. Notre observation est effectuée alors que le chanteur ne cherche pas à masquer la transition. Par rapport à ce phénomène passif, il peut néanmoins apprendre comment masquer la transition ou l'éviter (en restant dans le même mécanisme). Il peut également ajuster sa vibration laryngée par rapport à cette interaction, en fonction du mécanisme utilisé.

Une autre catégorie pourrait désigner les interactions mécaniques, il s'agit de l'influence de la musculature permettant de contrôler la forme du conduit vocal (les muscles de la langue notamment), sur la musculature laryngée. Cette interaction est présente dans la mesure où la

voyelle influence par exemple la position du larynx.

Si l'on s'en tient à une étude purement expérimentale, il est difficile d'identifier quels aspects résultent de quel type d'interaction, ce qui est lié au fait que le chanteur ne vise pas à limiter tel ou tel effet mais à obtenir une production vocale qui soit globalement valable. De plus le caractère actif (contrôlé par le chanteur) ou passif (subit par le chanteur quoi qu'il arrive) n'est pas évident à déterminer, comme nous l'avons souligné à propos des ajustements entre harmoniques et fréquences formantiques.

## Perspectives

Si notre travail a permis de clarifier un certain nombre de points et de répondre à différentes questions, il soulève aussi beaucoup d'interrogations et suggère plusieurs problématiques dont nous allons maintenant présenter les principales.

**Mécanismes et voyelles**

Au cours de notre étude, nous avons approché la problématique des voyelles à travers trois d'entre elles, le /a/, le /i/ et le /o/. Il s'agit évidemment d'une vision très réductrice de l'ensemble des voyelles. Bien que ces trois voyelles soient proches des angles du triangle vocalique (nous rappelons que nous avons choisi le /o/ car le /u/ est sujet à de fortes modifications dans le chant, par rapport à la voyelle parlée), il serait intéressant d'étendre l'étude à d'autres voyelles.

Nous pouvons aborder les voyelles d'un point de vue perceptif. Au cours de l'enregistrement, nous avons contrôlé «à l'oreille» les voyelles produites par les chanteurs, et demandé le cas échéant à refaire une production si nous considérions la voyelle trop éloignée de ce que nous demandions. Une étude de catégorisation des voyelles chantées sur les limites phonétographiques nous permettrait d'évaluer dans quelle mesure notre protocole a effectivement été respecté.

Nous avons abordé la description acoustique des voyelles par les mesures de fréquences formantiques effectuées sur les productions de M0. Cette méthode ne nous a pas permis de décrire les ajustements fins que les chanteurs ont été susceptibles d'effectuer dans un mécanisme et pas dans l'autre. Il nous semble qu'une étude orientée sur la caractérisation des voyelles en M1 et en M2, en fonction de la hauteur et de l'intensité, apporterait un complément substantiel à notre travail. Elle peut par exemple être effectuée par mesure des résonances du conduit vocal.

Enfin, et pour compléter notre étude sur les estimations formantiques en M0, il serait intéressant de mesurer les fréquences formantiques sur les productions de M1 ou de M2 et sur les M0 qui suivent, alors que le chanteur maintient la configuration du conduit vocal. Couplée à un test de catégorisation des voyelles perçues, cette étude permettrait de déterminer si la reconnaissance des voyelles est liée uniquement aux positions formantiques, ou si elle est aussi liée à la fréquence vibratoire, voire au mécanisme laryngé.

**Le mécanisme M2**

Comme nous avons eu l'occasion de le souligner à plusieurs reprises au long du manuscrit, l'essentiel des études traitant de la production vocale est centré sur la parole. Par ailleurs, les études qui ont été menées sur la voix chantée ont été effectuées par des scientifiques masculins, qui ont souvent basé leurs études et établi leurs concepts, à partir de leur propre expérience de la voix. Petit à petit, les méthodes d'analyse et les modèles qui ont été développés permettaient essentiellement d'étudier la parole et le chant masculins (la plus connue d'entre elle étant le filtrage inverse). En conséquence, les connaissances du fonctionnement du mécanisme M2 sont relativement limitées par rapport à celles du mécanisme M1: il reste beaucoup à comprendre, notamment en termes d'activités musculaires et de gestion de la pression sous-glottique, en M2. Les recherches futures orientées sur ces problématiques permettront sans aucun doute de mieux comprendre les différences de gestion des voyelles en M1 et en M2.

L'étude approfondie du mécanisme M2 au même titre que le M1 permettra également de mieux comprendre les différences vocales entre les hommes et les femmes. Comme nous l'avons

déjà souligné, dans le chant lyrique, une différence majeure est que les hommes utilisent principalement le M1 et les femmes principalement le M2. Que reste-t-il des différences hommes-femmes une fois que nous comparons les productions vocales à même mécanisme laryngé, à même hauteur et même intensité? Par exemple nous avons vu, grâce aux deux contre-ténors avec lesquels nous avons travaillé, que plusieurs aspects, comme l'égalisation de l'énergie du formant du chanteur en M1 et en M2 dans la zone de recouvrement, tenait à une pratique vocale et non au sexe du chanteur. Dans le chant lyrique, une telle étude se heurte au fait que les hommes et les femmes ne sont pas entrainés de la même façon à utiliser les deux mécanismes laryngés. La comparaison des mécanismes M1 et M2 pourrait donc être effectuée avec des chanteurs hommes et femmes, entrainés de la même façon à utiliser les mécanismes laryngés, donc issus d'un autre milieu que celui du chant lyrique. Ce pourrait être une étude sur différents styles de musiques traditionnelles, ou sur des musiques de variété (le belting notamment).

**Le phonétogramme**

Le phonétogramme présente l'ensemble des productions possibles dans le plan fréquence-intensité. Nous avons également étudié des phonétogrammes par paramètres, qui permettent de visualiser les valeurs d'un paramètre donné dans le plan phonétographique. L'établissement de phonétogrammes en distinguant les mécanismes laryngés lors de l'enregistrement nous a permis d'étudier la zone de recouvrement des mécanismes, et de décrire la dynamique vocale dans ces deux mécanismes.

Pour faire progresser la connaissance à partir des phonétogrammes, nous pensons que la question à laquelle nous devons maintenant répondre est celle de savoir ce que nous souhaitons étudier et représenter par le phonétogramme. Sur ces deux axes, nous avons placé des paramètres acoustiques (la fréquence et le SPL), mais ces paramètres sont parfois utilisés pour approcher des grandeurs plutôt perceptives. Nous suggérons d'orienter le phonétogramme vers une description plus précise de certains aspects liés à la voix chantée. Nous avons développé au cours de notre travail plusieurs niveaux de lecture : l'aspect de production vocale, l'aspect acoustique et l'aspect perceptif.

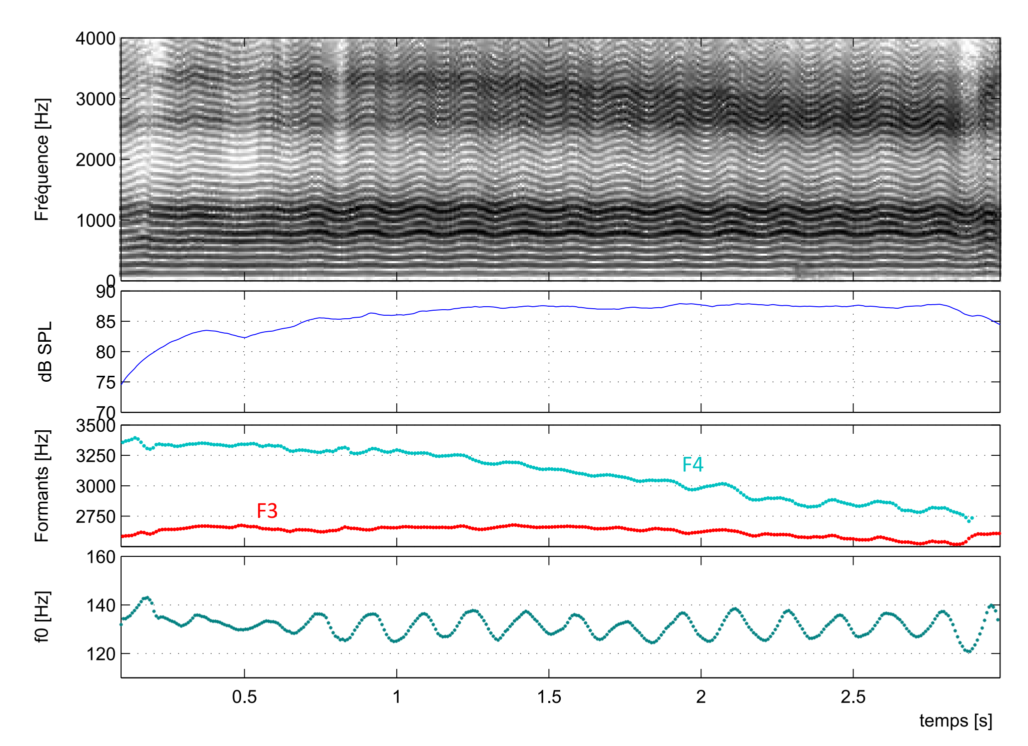



FIG. 9.10 – *Crescendo produit par CT1 sur un do2, en mécanisme M1, sur la voyelle /a/ (exemple sonore 18).*

Le SPL est un paramètre particulièrement éloigné de la notion perceptive d'intensité sonore, en particulier en voix chantée. À titre d'illustration, nous avons présenté dans la figure 9.10 un

crescendo effectué par CT1 sur un do2, voyelle /a/. Vers t = 1 s, le crescendo atteint sa limite en termes de SPL, mais nous observons des stratégies supplémentaires utilisées une fois atteint le maximum de SPL. En particulier, le vibrato de fréquence se déclenche, puis la fréquence du quatrième formant diminue, ce qui a probablement pour effet une diminution de la largeur de bande du formant du chanteur, mais aussi une augmentation de son niveau. Nous considérons que l'amplitude du formant du chanteur et le vibrato sont deux éléments importants dans la perception de l'intensité vocale. L'utilisation d'une échelle d'intensité exprimée en phones ou en sones (Hunter et Titze, 2005; Hunter *et al.*, 2006) permet déjà de mieux prendre en compte le formant du chanteur. Il serait en particulier intéressant de voir dans quelle mesure cette modification compense la différence observée entre les limites supérieures des phonétogrammes de M1 sur les voyelles /a/, /i/ et /o/. Pour approcher plus finement encore l'intensité perçue, il pourrait être nécessaire d'établir une nouvelle échelle prenant en compte le vibrato.

Pour décrire plus précisément le fonctionnement de l'appareil vocal, il serait intéressant de définir des phonétogrammes physiologiques, en remplaçant l'axe d'intensité par un axe de pression sous-glottique. Nous aurions alors une description nouvelle des potentialités vocales, et peut-être un positionnement relatif nouveau des mécanismes laryngés. Ce travail pose néanmoins la question épineuse de l'estimation de la pression sous-glottique, question à laquelle Lamarche et Ternström (2008) ont tenté de répondre par la mesure du niveau d'accélération de la peau du cou (*skin acceleration level*), sans résultats probants selon les auteurs. Dans un futur plus lointain encore, nous pouvons imaginer remplacer la fréquence vibratoire par l'activité d'un muscle intrinsèque.

La transformation à appliquer pour passer d'un phonétogramme de source (c'est-à-dire orienté vers une description du fonctionnement glottique) à un phonétogramme de perception pourrait également faire l'objet d'une étude approfondie.

**La comparaison entre M1 et M2 : quelle méthodologie ?**

Dans l'ensemble de la thèse, nous avons pris le parti de comparer les productions de M1 et de M2 à hauteur et intensité fixées. Ce choix s'inscrit dans une description acoustique des phénomènes. Comme nous l'avons mentionné un peu plus haut, elle a le défaut de comparer le mécanisme M1 dans une zone de forte tension au mécanisme M2 dans une zone de faible tension (en termes musculaires). D'autres façons de comparer les productions des deux mécanismes peuvent néanmoins être envisagées. Par exemple, il pourrait être pertinent de comparer des phonétogrammes de M1 et de M2 en utilisant les méthodes de normalisation de fréquence (*rescaling method*), pour voir quel mécanisme est le plus étendu, quel mécanisme permet de produire les sons les plus forts, mais aussi quel mécanisme nécessite la plus grande pression sous-glottique, etc. Ce travail doit évidemment être effectué avec des chanteurs de M1 et des chanteurs de M2, puisque l'étendue fréquentielle de chaque mécanisme ainsi que la dynamique vocale dépendent de l'entrainement vocal. À partir de là, nous pouvons comparer des productions de M1 et de M2, situées par exemple au milieu de la tessiture de chaque mécanisme laryngé (ce qui ne correspond pas à la même fréquence). Il est probable que cette méthode s'approche d'une comparaison à effort musculaire plus comparable (ce serait à vérifier). Dans un avenir plus lointain, nous pouvons aussi imaginer de comparer des productions de M1 et de M2 pour une activité donnée des muscles thyro-aryténoïdiens et crico-thyroïdiens, ou pour une pression sous-glottique donnée et une activité donnée d'un des muscles intrinsèques.

**Acoustique et chant : quelle pluridisciplinarité ?**

La voix chantée est un domaine fondamentalement pluridisciplinaire. Aujourd'hui, même dans le domaine académique, plusieurs champs disciplinaires traitent du chant, en plus de toutes les approches non académiques, au premier rang desquelles nous placerons la pratique artistique. Nous considérons chaque domaine ou chaque approche comme un point de vue sur notre objet d'étude multidimensionnel. Nous avons fait le choix, dès l'établissement de notre problématique, de nous intéresser aux relations entre mécanismes et voyelles, car ces relations posent question à la fois dans le domaine musical et le domaine scientifique. Nous avons bénéficié de l'approche

développée depuis de nombreuses années au LAM, visant à travailler avec des musiciens, en les considérant comme des collaborateurs plus que comme des sujets, ce qui leur permet de nous apporter une partie de leur expertise et leur connaissance de la voix. Cet apport nous a permis de prendre conscience de la distance entre un certain aspect un peu rudimentaire des descriptions acoustiques et physiologiques du fonctionnement vocal, et la grande finesse de ressenti développée par les artistes. Cette distance est liée à la différence d'approche, l'une analytique, l'autre fondée sur l'expérience.

Dans le but de décrire plus clairement notre problématique du point de vue des chanteurs, nous avons mis en place une collaboration avec Danièle Dubois et Luiza Maxim pour dépouiller les données verbales que nous avions recueillies. Cette approche nous a permis de comprendre quelles associations les chanteurs font entre mécanismes et voyelles, comment ils perçoivent les mécanismes laryngés. L'analyse linguistique permet en outre d'expliciter la façon dont les chanteurs se positionnent par rapport à ce qu'ils décrivent. Nous pensons que le développement de cette approche permettra d'affiner les descriptions du fonctionnement de l'appareil vocal, en lien plus étroit avec l'expertise des chanteurs.

Nous avons également fait l'expérience de cette cohabitation difficile entre acoustique et chant en termes de validité écologique du protocole d'enregistrement : nous avons constaté une tension forte entre les exigences de la science acoustique et celles des conditions dans lesquelles un chanteur peut prétendre résolument effectuer des productions artistiquement valables. Beaucoup des chanteurs ayant participé à notre travail ont mentionné avoir effectué des productions vocales, mais qui ne représentent pas ce qu'ils produiraient en concert. Le fait de travailler avec des chanteurs très professionnels et habitués aux contraintes expérimentales permet, selon nous, de minimiser cet écart, mais probablement pas de l'éliminer. Dans le même temps, travailler exclusivement avec des professionnels ne permet pas d'étudier certains aspects comme l'entraînement vocal. Il s'agit donc, en fonction du type d'étude visée, de trouver un équilibre entre les exigences du dispositif utilisé et celles des chanteurs.

Un autre aspect de la distance entre l'approche des chanteurs et celles des scientifiques s'est manifesté lors du dépouillement des données : l'étude de la corrélation entre deux paramètres s'avère compliquée à effectuer s'il est nécessaire de prendre systématiquement en compte la hauteur, l'intensité, les voyelles, les mécanismes laryngés, et en plus la variabilité inter-sujet, l'expertise des chanteurs, le sexe, leur utilisation d'un mécanisme plutôt que de l'autre...

Nous pensons que la distance entre description acoustique et pratique vocale est aussi liée à la façon dont la connaissance du fonctionnement vocal dans le chant a été construite, c'est à dire comme un prolongement de la parole. À ce titre, nous estimons avoir eu la chance d'évoluer au sein du LAM où la plupart des chercheurs ont une connaissance et une expérience de la musique, du niveau amateur à un niveau quasi-professionnel selon les personnes, et où les fondateurs du laboratoire ont toujours insisté pour lier l'expertise musicale (notamment en termes de finesse d'écoute) et l'expertise scientifique. Nous pensons qu'une approche pluridisciplinaire de la voix chantée permettra d'établir des liens concrets entre les différents domaines d'expertises traitant du chant, ce qui pourra permettre d'établir une connaissance commune, donc objective et élargie à propos de notre objet d'étude.

# Annexe A

# Détails des analyses statistiques

Nous allons présenter l'ensemble des détails des analyses statistiques dont nous avons présenté les résultats au cours du manuscrit. Il s'agit uniquement d'anayses de variances (ANOVA) à une dimension. Pour l'ensemble des tableaux, dl désigne le nombre de degrés de libertés, F la statistique et p la p-valeur.

## A.1 Test de l'influence de la voyelle sur les limites phonétographiques

| | M1 | | | | M2 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | dl | F | p | | dl | F | p | |
| do2 | 38 | 0,07 | 0,928 | ns | 8 | 1,19 | 0,366 | ns |
| ré2 | 38 | 0,15 | 0,858 | ns | 28 | 0,21 | 0,813 | ns |
| mi2 | 38 | 0,16 | 0,849 | ns | 37 | 0,74 | 0,485 | ns |
| fa#2 | 38 | 0,06 | 0,946 | ns | 37 | 1,08 | 0,351 | ns |
| sol#2 | 38 | 0,05 | 0,952 | ns | 38 | 0,81 | 0,452 | ns |
| sib2 | 38 | 0,05 | 0,955 | ns | 38 | 1,04 | 0,364 | ns |
| do3 | 38 | 0,02 | 0,984 | ns | 38 | 1,70 | 0,197 | ns |
| ré3 | 38 | 0,03 | 0,975 | ns | 38 | 2,05 | 0,144 | ns |
| mi3 | 35 | 0,42 | 0,662 | ns | 38 | 1,66 | 0,204 | ns |
| fa#3 | 28 | 0,01 | 0,990 | ns | 38 | 2,00 | 0,150 | ns |
| sol#3 | 16 | 0,38 | 0,694 | ns | 38 | 1,22 | 0,307 | ns |
| sib3 | 8 | 1,04 | 0,409 | ns | 38 | 1,41 | 0,258 | ns |
| do4 | 5 | 0,48 | 0,660 | ns | 36 | 0,11 | 0,895 | ns |

Tab. A.1 – *Résultats statistiques de l'influence de la voyelle sur la* ***limite inférieure*** *des phonétogrammes, en M1 et en M2 séparément. Chanteurs* ***hommes****.*

| | M1 | | | | M2 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | dl | F | p | | dl | F | p | |
| do2 | 11 | 0,28 | 0,760 | ns | 0 | | | |
| ré2 | 16 | 0,79 | 0,473 | ns | 4 | 0,38 | 0,727 | ns |
| mi2 | 21 | 1,24 | 0,312 | ns | 11 | 1,40 | 0,295 | ns |
| fa#2 | 23 | 0,08 | 0,925 | ns | 16 | 0,26 | 0,777 | ns |
| sol#2 | 23 | 0,25 | 0,780 | ns | 17 | 0,51 | 0,614 | ns |
| sib2 | 23 | 0,02 | 0,983 | ns | 19 | 1,72 | 0,210 | ns |
| do3 | 23 | 1,24 | 0,311 | ns | 22 | 1,90 | 0,176 | ns |
| ré3 | 23 | 1,47 | 0,253 | ns | 23 | 1,33 | 0,286 | ns |
| mi3 | 23 | 0,46 | 0,636 | ns | 23 | 0,85 | 0,441 | ns |
| fa#3 | 23 | 0,18 | 0,835 | ns | 23 | 1,04 | 0,369 | ns |
| sol#3 | 15 | 0,39 | 0,683 | ns | 23 | 1,41 | 0,266 | ns |
| sib3 | 9 | 0,17 | 0,846 | ns | 23 | 0,46 | 0,637 | ns |
| do4 | 5 | 0,09 | 0,919 | ns | 23 | 0,13 | 0,877 | ns |

TAB. A.2 – *Résultats statistiques de l'influence de la voyelle sur la **limite inférieure** des phonétogrammes, en M1 et en M2 séparément. Chanteurs **femmes**.*

| | M1 | | | | M2 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | dl | F | p | | dl | F | p | |
| do2 | 38 | 13,10 | 0,000 | *** | 8 | 2,23 | 0,189 | ns |
| ré2 | 38 | 23,20 | 0,000 | *** | 28 | 0,29 | 0,752 | ns |
| mi2 | 38 | 37,40 | 0,000 | *** | 37 | 0,28 | 0,761 | ns |
| fa#2 | 38 | 26,40 | 0,000 | *** | 37 | 0,63 | 0,538 | ns |
| sol#2 | 38 | 29,30 | 0,000 | *** | 38 | 0,99 | 0,381 | ns |
| sib2 | 38 | 32,80 | 0,000 | *** | 38 | 1,80 | 0,181 | ns |
| do3 | 38 | 40,90 | 0,000 | *** | 38 | 0,90 | 0,417 | ns |
| ré3 | 38 | 26,80 | 0,000 | *** | 38 | 1,94 | 0,159 | ns |
| mi3 | 35 | 8,23 | 0,001 | ** | 38 | 4,92 | 0,013 | * |
| fa#3 | 28 | 9,75 | 0,001 | *** | 38 | 2,04 | 0,145 | ns |
| sol#3 | 16 | 2,04 | 0,167 | ns | 38 | 4,53 | 0,018 | * |
| sib3 | 8 | 0,44 | 0,665 | ns | 38 | 0,66 | 0,524 | ns |
| do4 | 5 | 0,05 | 0,953 | ns | 36 | 1,27 | 0,295 | ns |

TAB. A.3 – *Résultats statistiques de l'influence de la voyelle sur la **limite supérieure** des phonétogrammes, en M1 et en M2 séparément. Chanteurs **hommes**.*

| | M1 | | | | M2 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | dl | F | p | | dl | F | p | |
| do2 | 23 | 7,87 | 0,003 | ** | 4 | 0,79 | 0,557 | ns |
| ré2 | 23 | 13,90 | 0,000 | *** | 20 | 0,84 | 0,447 | ns |
| mi2 | 23 | 22,10 | 0,000 | *** | 22 | 0,20 | 0,819 | ns |
| fa#2 | 23 | 15,30 | 0,000 | *** | 22 | 0,60 | 0,560 | ns |
| sol#2 | 23 | 26,20 | 0,000 | *** | 23 | 1,58 | 0,230 | ns |
| sib2 | 23 | 38,80 | 0,000 | *** | 23 | 5,21 | 0,015 | * |
| do3 | 23 | 45,10 | 0,000 | *** | 23 | 5,55 | 0,012 | * |
| ré3 | 23 | 18,00 | 0,000 | *** | 23 | 6,31 | 0,007 | ** |
| mi3 | 21 | 5,22 | 0,016 | * | 23 | 9,62 | 0,001 | ** |
| fa#3 | 16 | 15,60 | 0,000 | *** | 23 | 3,70 | 0,042 | * |
| sol#3 | 7 | 2,25 | 0,201 | ns | 23 | 1,77 | 0,195 | ns |
| sib3 | | | | | 23 | 0,03 | 0,966 | ns |
| do4 | | | | | 21 | 1,68 | 0,213 | ns |

TAB. A.4 – *Résultats statistiques de l'influence de la voyelle sur la* ***limite supérieure*** *des phonétogrammes, en M1 et en M2 séparément. Chanteurs* ***femmes****.*

## A.2 Test de l'influence de la voyelle sur la dynamique vocale

| | M1 | | | | M2 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | dl | F | p | | dl | F | p | |
| do2 | 38 | 6,77 | 0,003 | ** | 8 | | | |
| ré2 | 38 | 8,96 | 0,001 | *** | 28 | 0,08 | 0,919 | ns |
| mi2 | 38 | 11,80 | 0,000 | *** | 37 | 0,60 | 0,556 | ns |
| fa#2 | 38 | 4,67 | 0,016 | * | 37 | 1,96 | 0,156 | ns |
| sol#2 | 38 | 6,50 | 0,004 | ** | 38 | 1,96 | 0,156 | ns |
| sib2 | 38 | 5,71 | 0,007 | ** | 38 | 2,66 | 0,083 | * |
| do3 | 38 | 7,42 | 0,002 | ** | 38 | 3,10 | 0,057 | * |
| ré3 | 38 | 3,01 | 0,062 | * | 38 | 1,89 | 0,166 | ns |
| mi3 | 35 | 0,57 | 0,571 | ns | 38 | 4,16 | 0,024 | * |
| fa#3 | 28 | 1,44 | 0,256 | ns | 38 | 2,08 | 0,139 | ns |
| sol#3 | 16 | 0,08 | 0,920 | ns | 38 | 0,32 | 0,726 | ns |
| sib3 | 8 | | | | 38 | 0,82 | 0,448 | ns |
| do4 | 5 | | | | 36 | 0,25 | 0,778 | ns |

TAB. A.5 – *Résultats statistiques de l'influence de la voyelle sur la* ***dynamique vocale****, en M1 et en M2 séparément. Chanteurs* ***hommes****.*

| | M1 | | | | M2 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | dl | F | p | | dl | F | p | |
| do2 | 11 | 0,14 | 0,870 | ns | 0 | | | |
| ré2 | 16 | 2,01 | 0,171 | ns | 4 | | | |
| mi2 | 21 | 5,32 | 0,015 | * | 11 | 1,16 | 0,356 | ns |
| fa#2 | 23 | 7,78 | 0,003 | ** | 16 | 0,04 | 0,959 | ns |
| sol#2 | 23 | 4,56 | 0,023 | * | 17 | 1,47 | 0,262 | ns |
| sib2 | 23 | 8,04 | 0,003 | ** | 19 | 2,08 | 0,155 | ns |
| do3 | 23 | 11,00 | 0,001 | *** | 22 | 3,84 | 0,039 | * |
| ré3 | 23 | 10,00 | 0,001 | *** | 23 | 2,14 | 0,143 | ns |
| mi3 | 23 | 0,60 | 0,558 | ns | 23 | 1,36 | 0,279 | ns |
| fa#3 | 23 | 1,78 | 0,193 | ns | 23 | 1,64 | 0,217 | ns |
| sol#3 | 15 | 1,25 | 0,319 | ns | 23 | 1,17 | 0,329 | ns |
| sib3 | 9 | 0,08 | 0,925 | ns | 23 | 0,26 | 0,777 | ns |
| do4 | 5 | | | | 23 | 0,26 | 0,772 | ns |

TAB. A.6 – *Résultats statistiques de l'influence de la voyelle sur la **dynamique vocale**, en M1 et en M2 séparément. Chanteurs **femmes**.*

## A.3 Test de l'influence de la voyelle sur l'aire des phonétogrammes

| | M1 | | | | M2 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | dl | F | p | | dl | F | p | |
| Hommes | 38 | 4,61 | 0,016 | * | 38 | 2,49 | 0,096 | ns |
| Femmes | 23 | 4,44 | 0,025 | * | 23 | 0,86 | 0,438 | ns |

TAB. A.7 – *Résultats statistiques de l'influence de la voyelle sur l' **aire des phonétogrammes**, en M1 et en M2 séparément, pour les **femmes** et pour les **hommes**.*

## A.4 Tests de l'influence de la voyelle et des mécanismes laryngés sur les pentes phonétographiques et de la limite supérieure.

| | M1 | | | | M2 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | dl | F | p | | dl | F | p | |
| Femmes | 23 | 0,11 | 0,895 | ns | 23 | 0,16 | 0,849 | ns |
| Hommes | 38 | 0,97 | 0,389 | ns | 38 | 0,51 | 0,607 | ns |

Tab. A.8 – *Résultats statistiques de l'influence de la voyelle sur la* ***pente des phonétogrammes****, en M1 et en M2 séparément, pour les* ***femmes*** *et pour les* ***hommes****.*

| | dl | F | p | |
|---|---|---|---|---|
| Hommes | 77 | 5,69 | 0,020 | * |
| Femmes | 47 | 0,60 | 0,443 | ns |

Tab. A.9 – *Résultats statistiques de l'influence du mécanisme laryngé sur la* ***pente des phonétogrammes****, pour les* ***femmes*** *et pour les* ***hommes****.*

| | M1 | | | | M2 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | dl | F | p | | dl | F | p | |
| Hommes | 38 | 2,48 | 0,098 | ns | 38 | 0,58 | 0,567 | ns |
| Femmes | 23 | 0,38 | 0,690 | ns | 23 | 1,33 | 0,285 | ns |

Tab. A.10 – *Résultats statistiques de l'influence de la voyelle sur la* ***pente de la limite supérieure****, en M1 et en M2 séparément, pour les* ***femmes*** *et pour les* ***hommes****.*

| | dl | F | p | |
|---|---|---|---|---|
| Hommes | 77 | 163 | 0,000 | *** |
| Femmes | 47 | 21,3 | 0,000 | *** |

Tab. A.11 – *Résultats statistiques de l'influence du mécanisme laryngé sur la* ***pente de la limite supérieure****, pour les* ***femmes*** *et pour les* ***hommes****.*

## A.5 Tests de la différence des limites supérieures des phonétogrammes obtenues sur /a/ et /i/, entre les résultats mesurés en M2 et ceux simulés

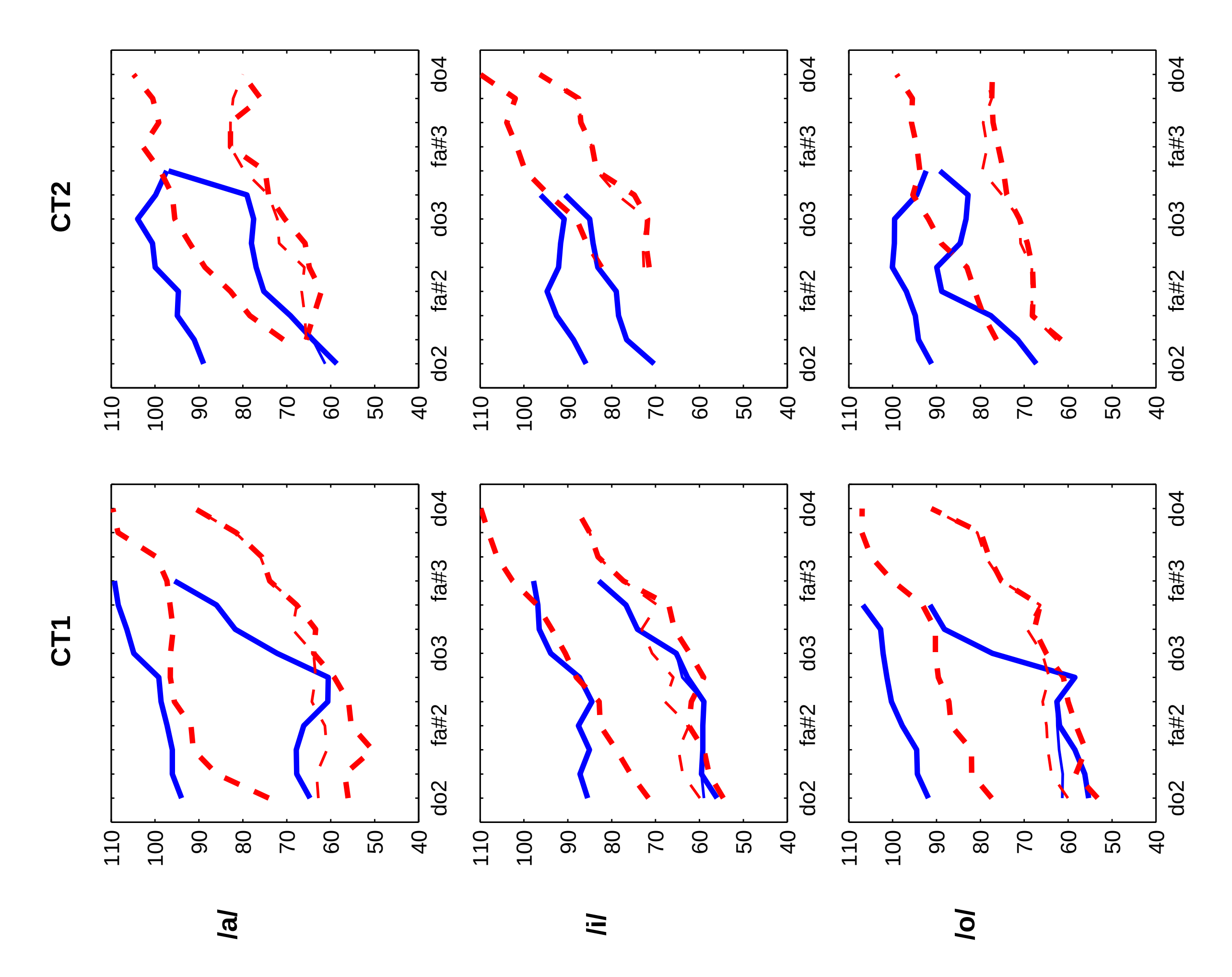
| | Hommes | | | | Femmes | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | dl | F | p | | dl | F | p | |
| fa#2 | 17 | 5,73 | 0,029 | * | | | | |
| sol#2 | 19 | 0,55 | 0,467 | ns | 9 | 1,13 | 0,318 | ns |
| sib2 | 23 | 0,32 | 0,575 | ns | 11 | 3,19 | 0,104 | ns |
| do3 | 23 | 2,56 | 0,124 | ns | 13 | 4,47 | 0,056 | * |
| ré3 | 25 | 2,30 | 0,143 | ns | 12 | 7,07 | 0,022 | * |
| mi3 | 22 | 0,14 | 0,711 | ns | 14 | 0,64 | 0,437 | ns |
| fa#3 | 19 | 0,10 | 0,755 | ns | 14 | 0,58 | 0,459 | ns |
| sol#3 | 16 | 2,59 | 0,128 | ns | 12 | 0,64 | 0,440 | ns |

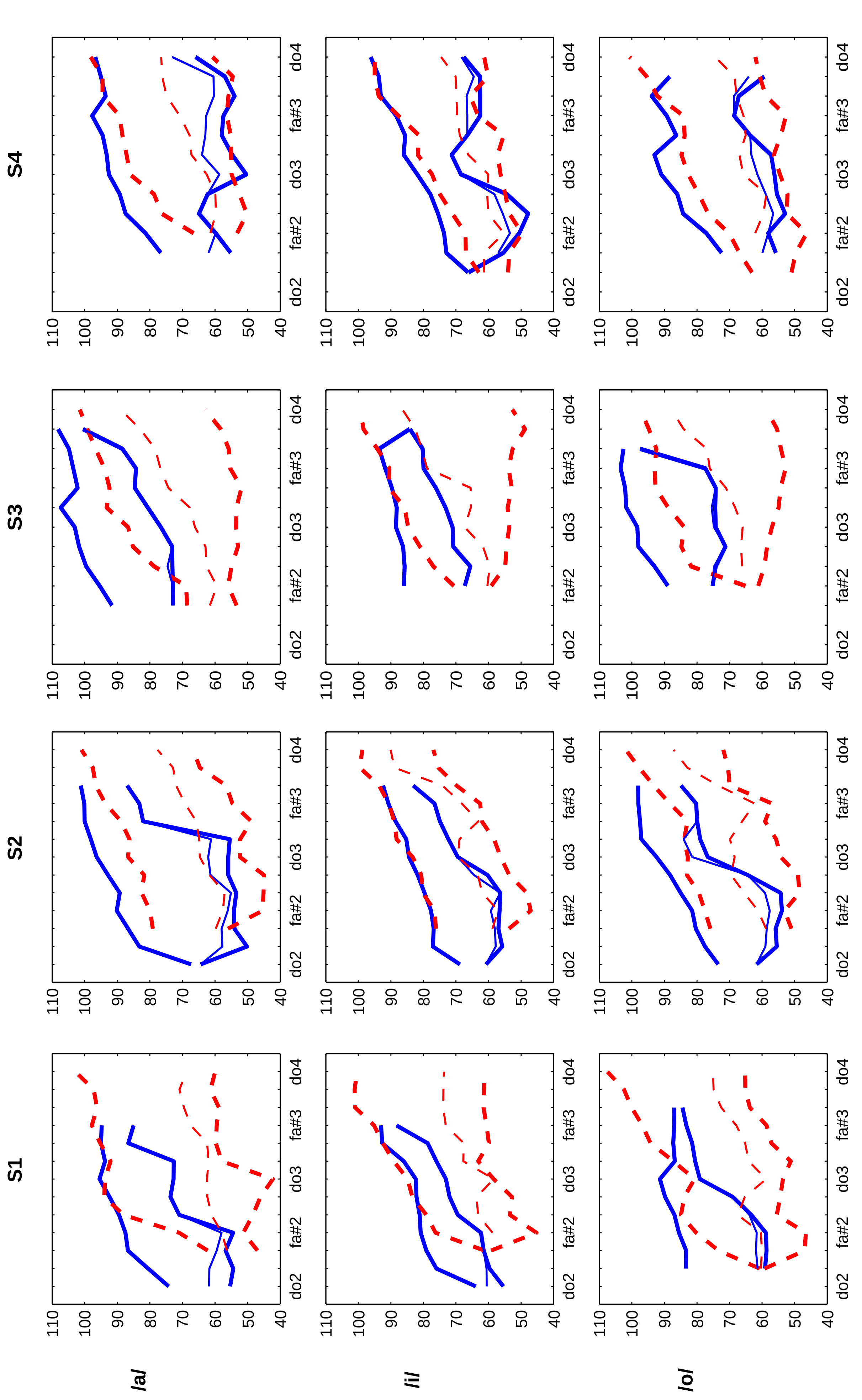
TAB. A.12 – *Résultats de l'analyse statistique de la différence des limites supérieures des phonétogrammes obtenues sur /a/ et /i/, entre les résultats mesurés en M2 et ceux simulés. Les résultats sont présentés séparément pour les hommes et pour les femmes.*

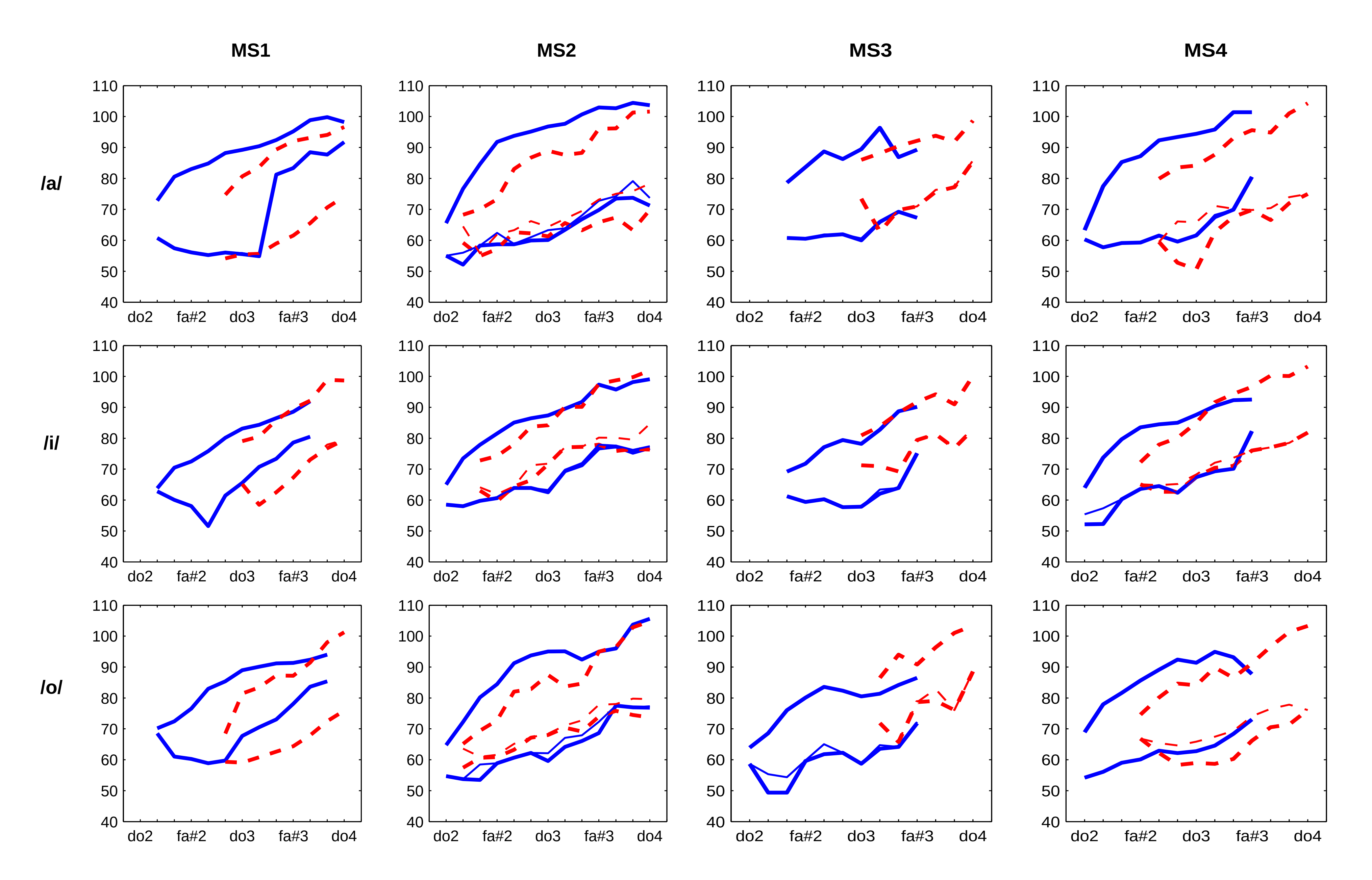
# Annexe B

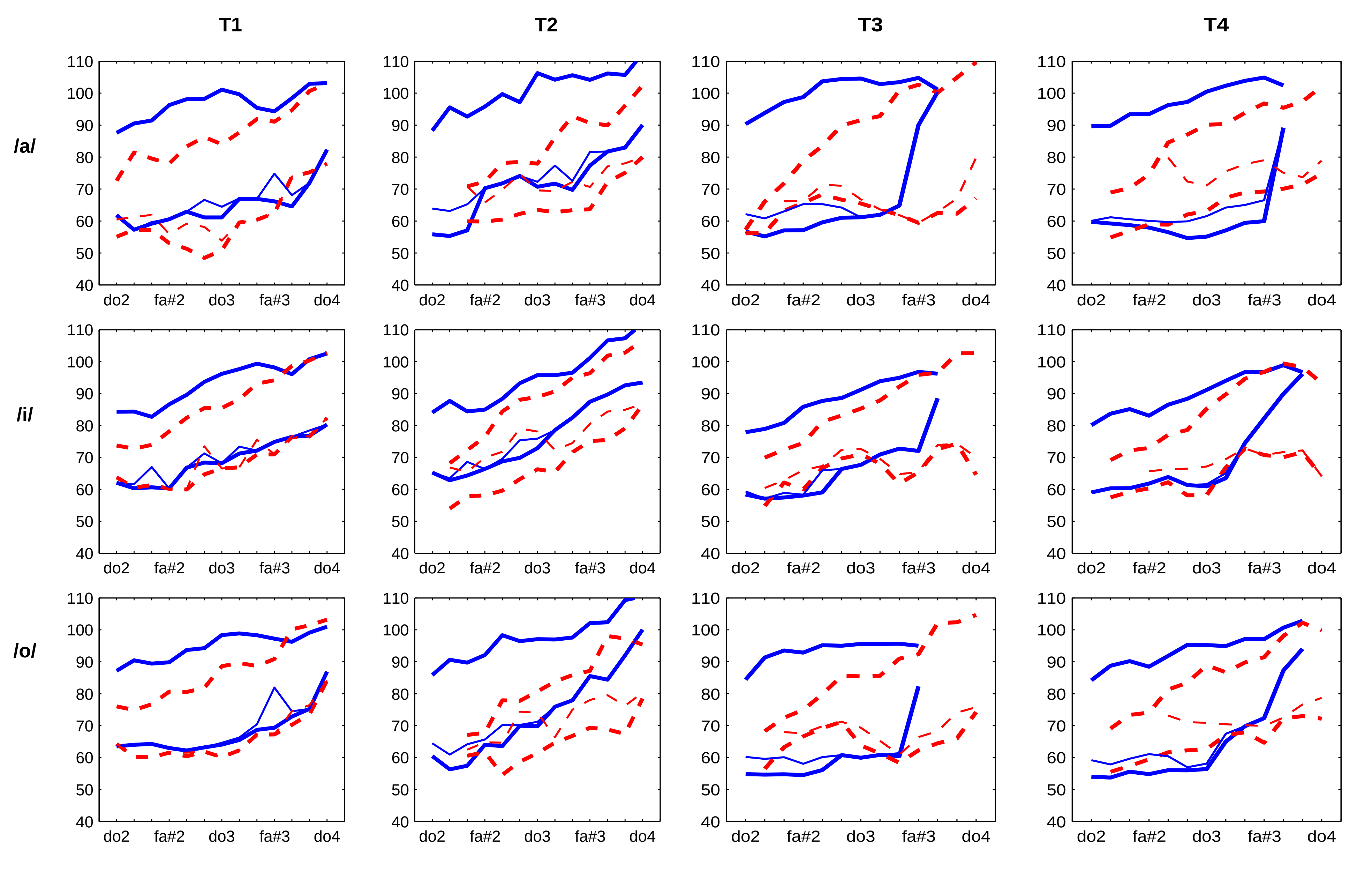
# Limites des phonétogrammes

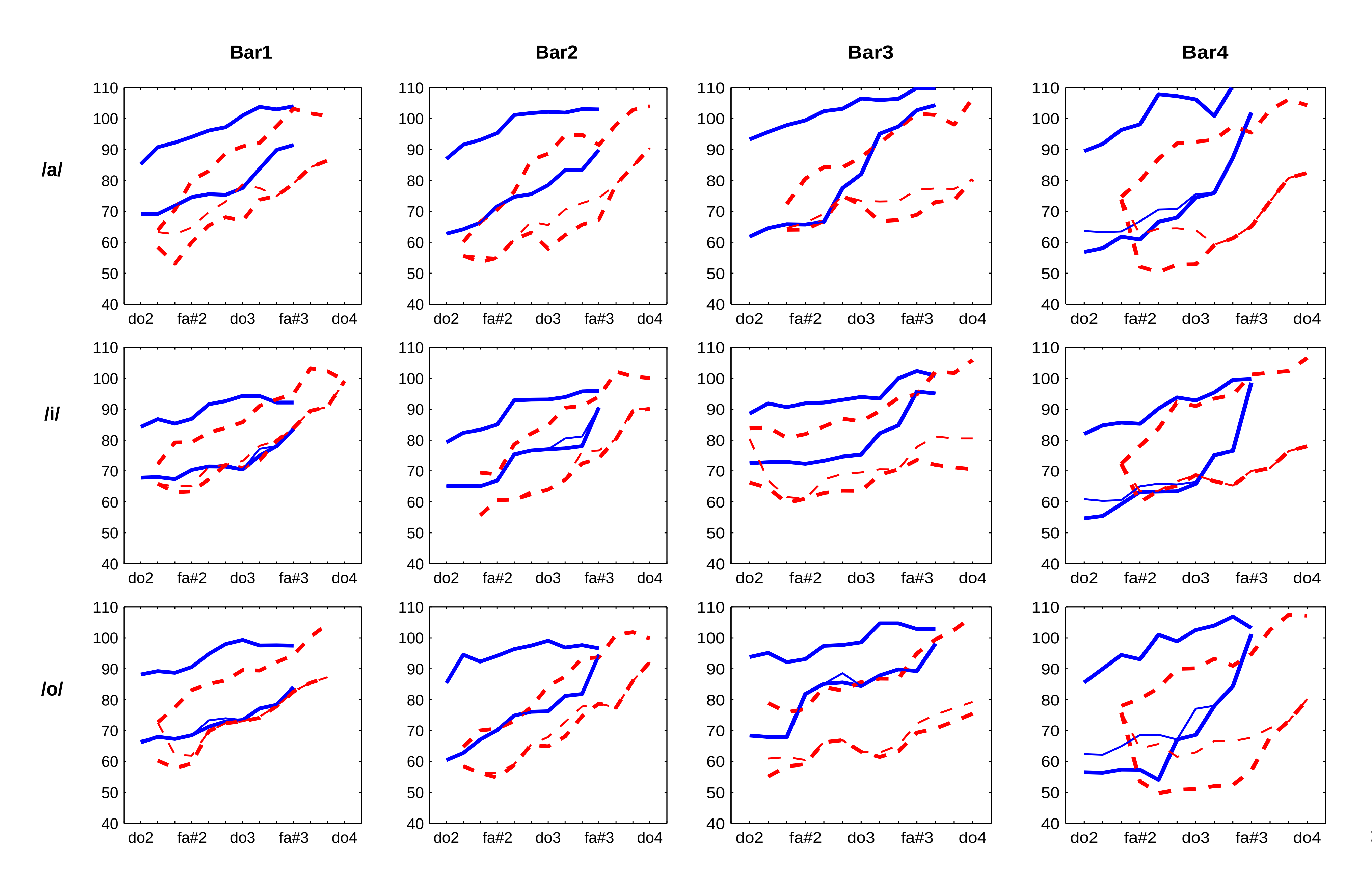
Dans l'ensemble de cette annexe, nous présentons les phonétogrammes par mécanismes et par voyelles, séparément pour chaque chanteur. Chaque figure correspond à une voyelle donnée, les phonétogrammes de M1 sont tracés en traits pleins (bleus) et ceux de M2 en traits pointillés (rouges). Pour chaque mécanisme, la limite d'accolement glottique détectée figure en traits fins.

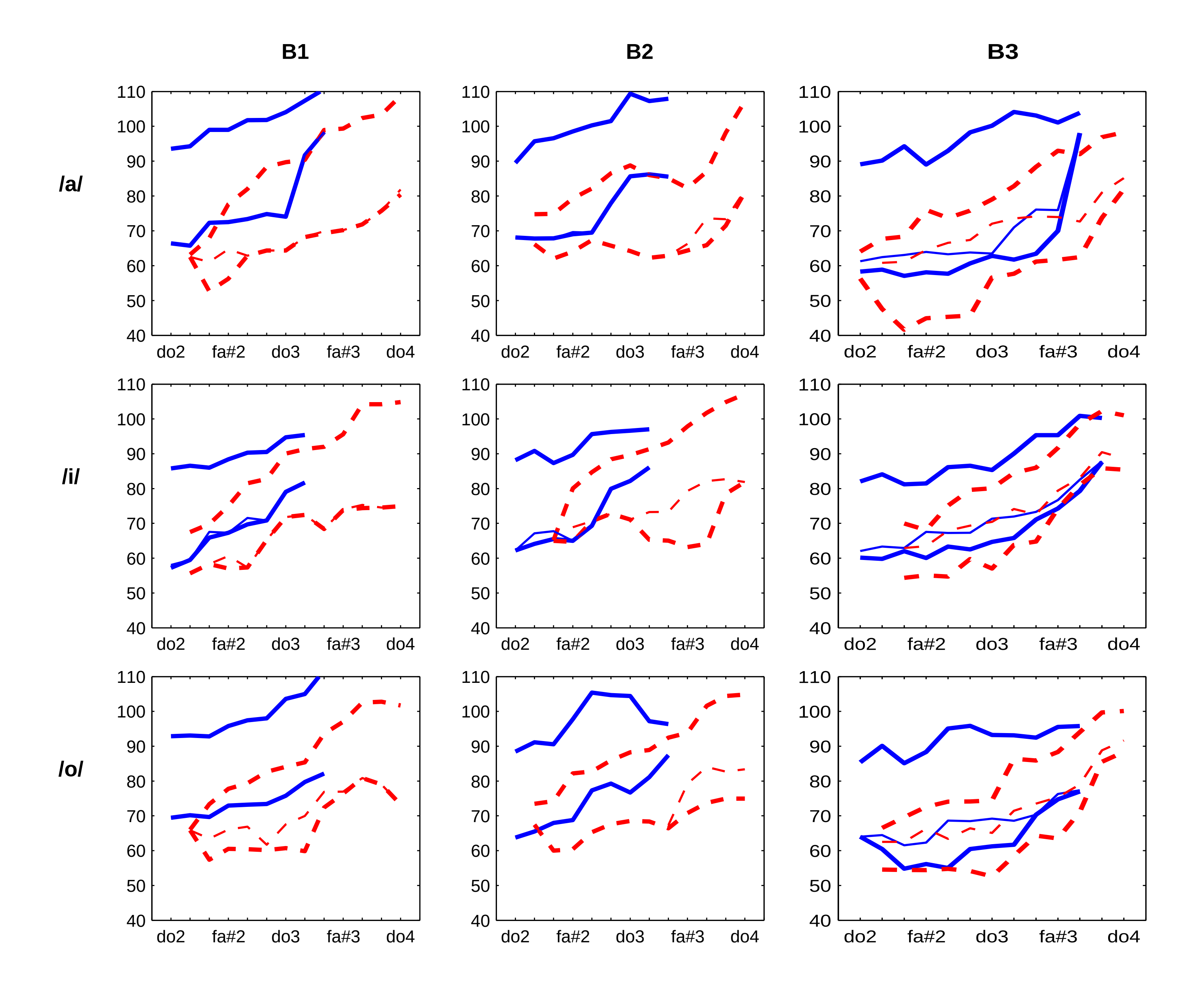



S1
S2
S3
S4
/a/
/i/
/o/
110
100
90
80
70
60
50
40
do2
fa#2
do3
fa#3
do4


MS1
MS2
MS3
MS4
/a/
/i/
/o/
110
100
90
80
70
60
50
40
do2
fa#2
do3
fa#3
do4


T1
T2
T3
T4
/a/
/i/
/o/
110
100
90
80
70
60
50
40
do2
fa#2
do3
fa#3
do4

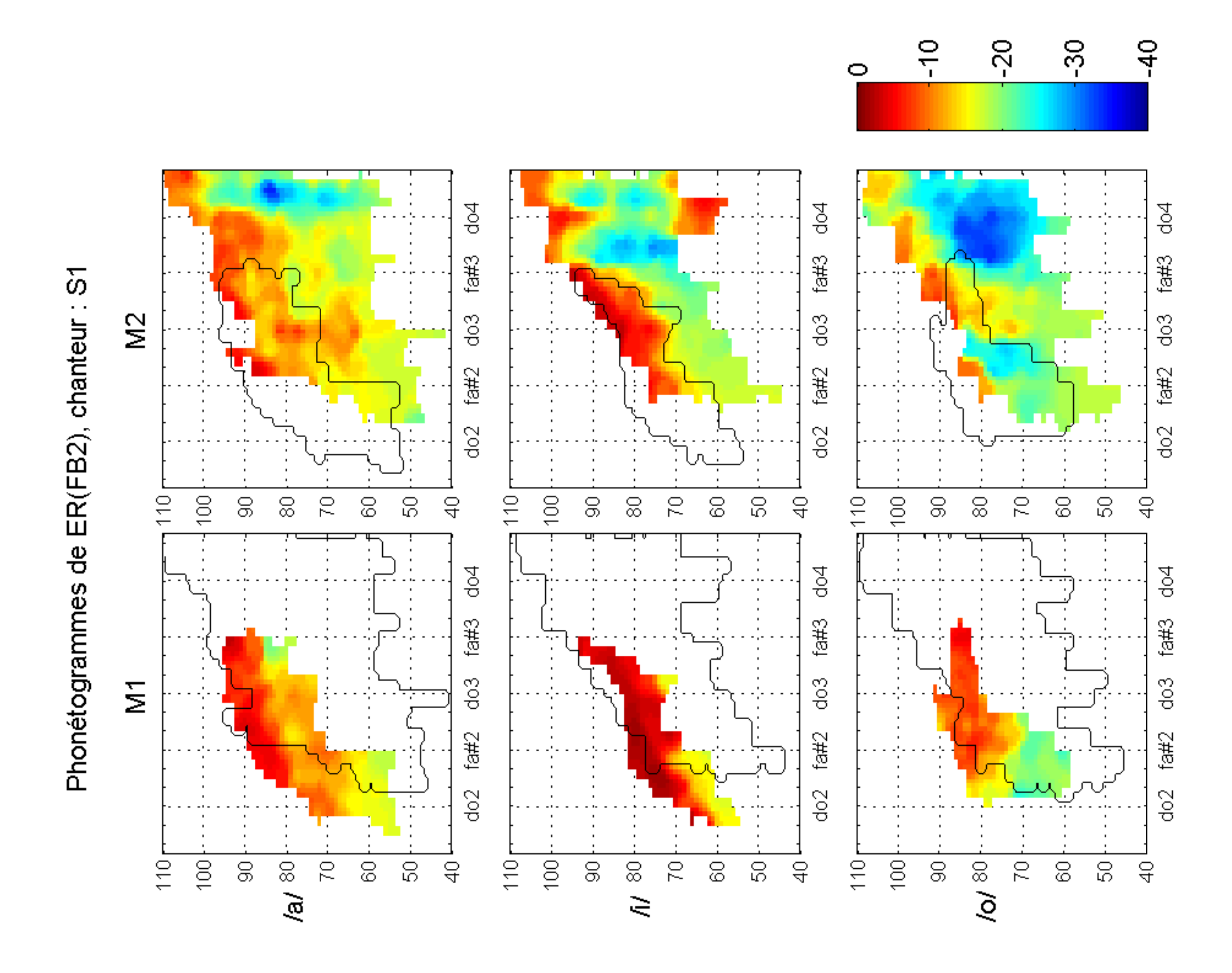

Bar1
Bar2
Bar3
Bar4
/a/
/i/
/o/
110
100
90
80
70
60
50
40
do2
fa#2
do3
fa#3
do4

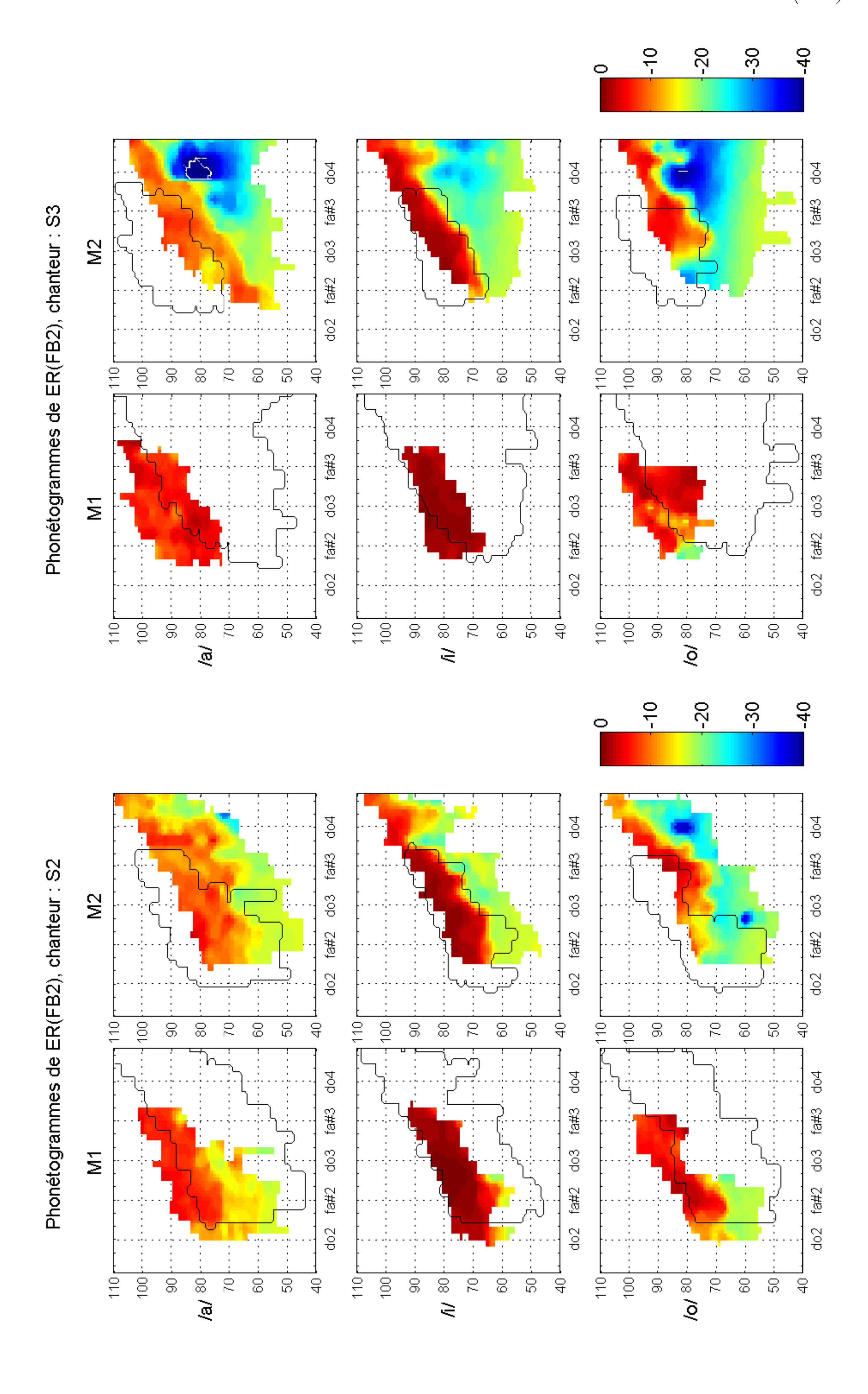

B1
B2
B3
/a/
/i/
/o/
110
100
90
80
70
60
50
40
do2
fa#2
do3
fa#3
do4

# Annexe C

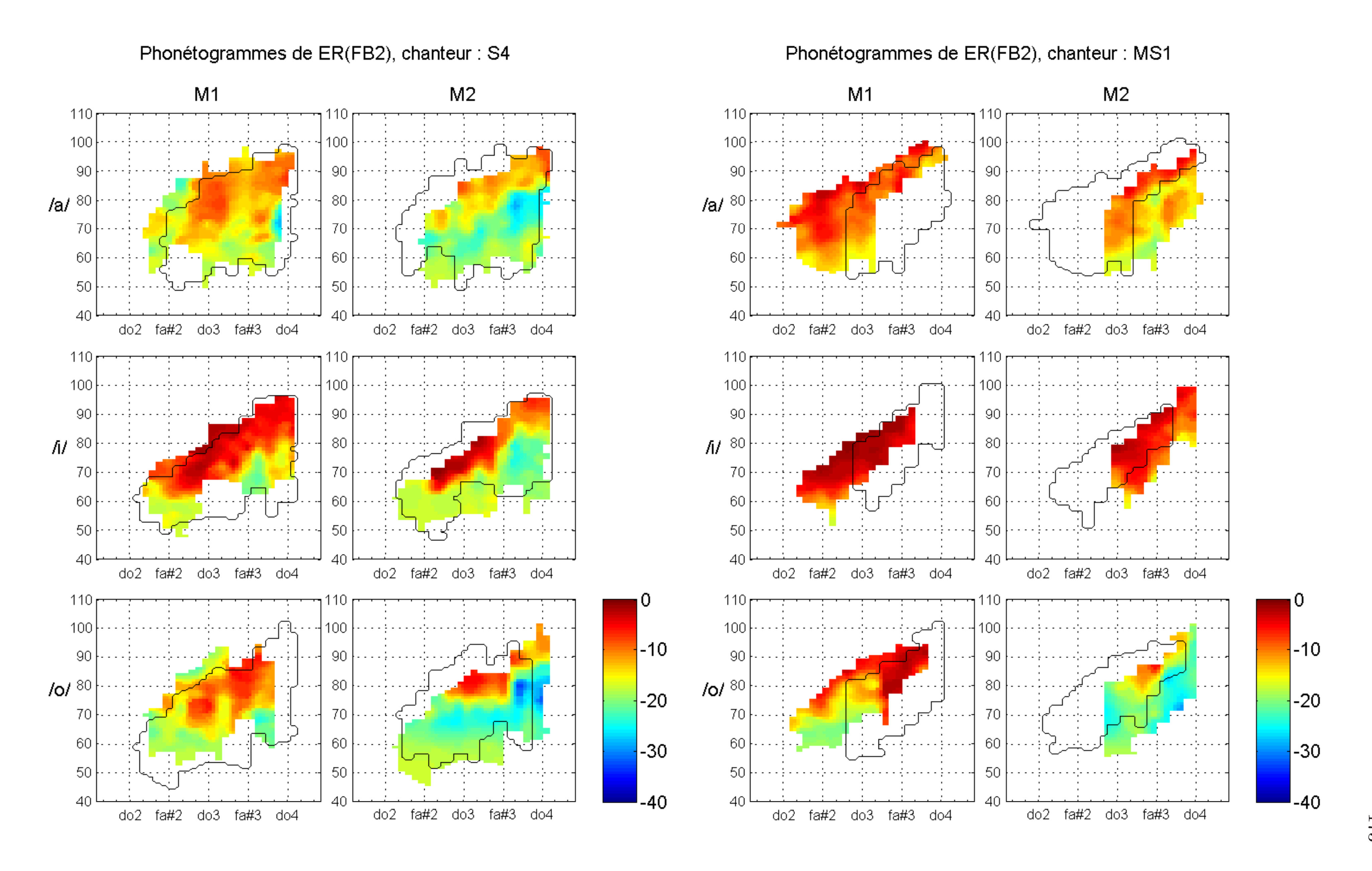
# Phonétogrammes de ER(FB2)

Dans l'ensemble de cette annexe, nous présentons les phonétogrammes de ER(FB2), par mécanisme laryngé, par voyelle, et pour chaque chanteur. Le ER(FB2) est exprimé en dB, et est défini dans le chapitre 7.

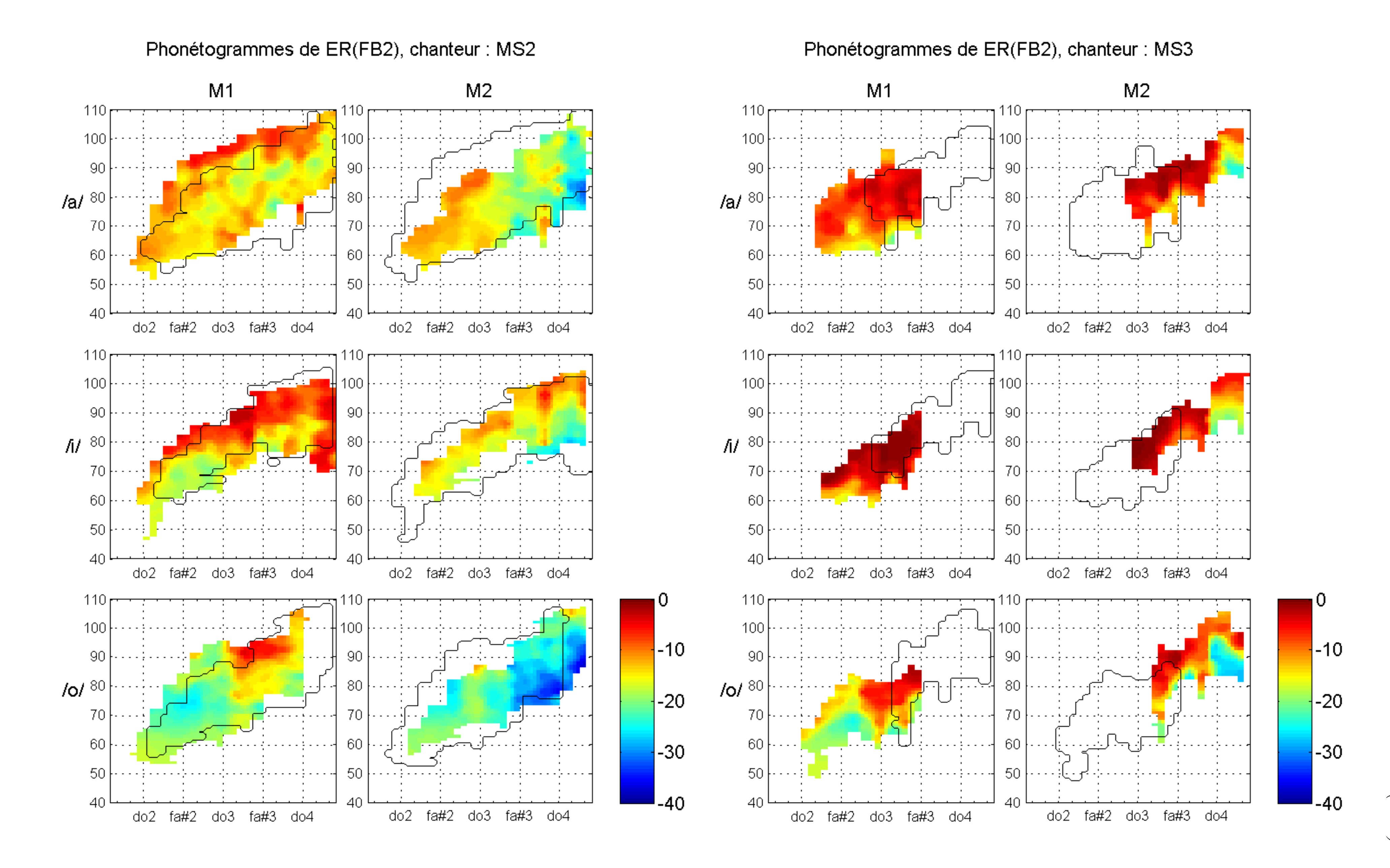


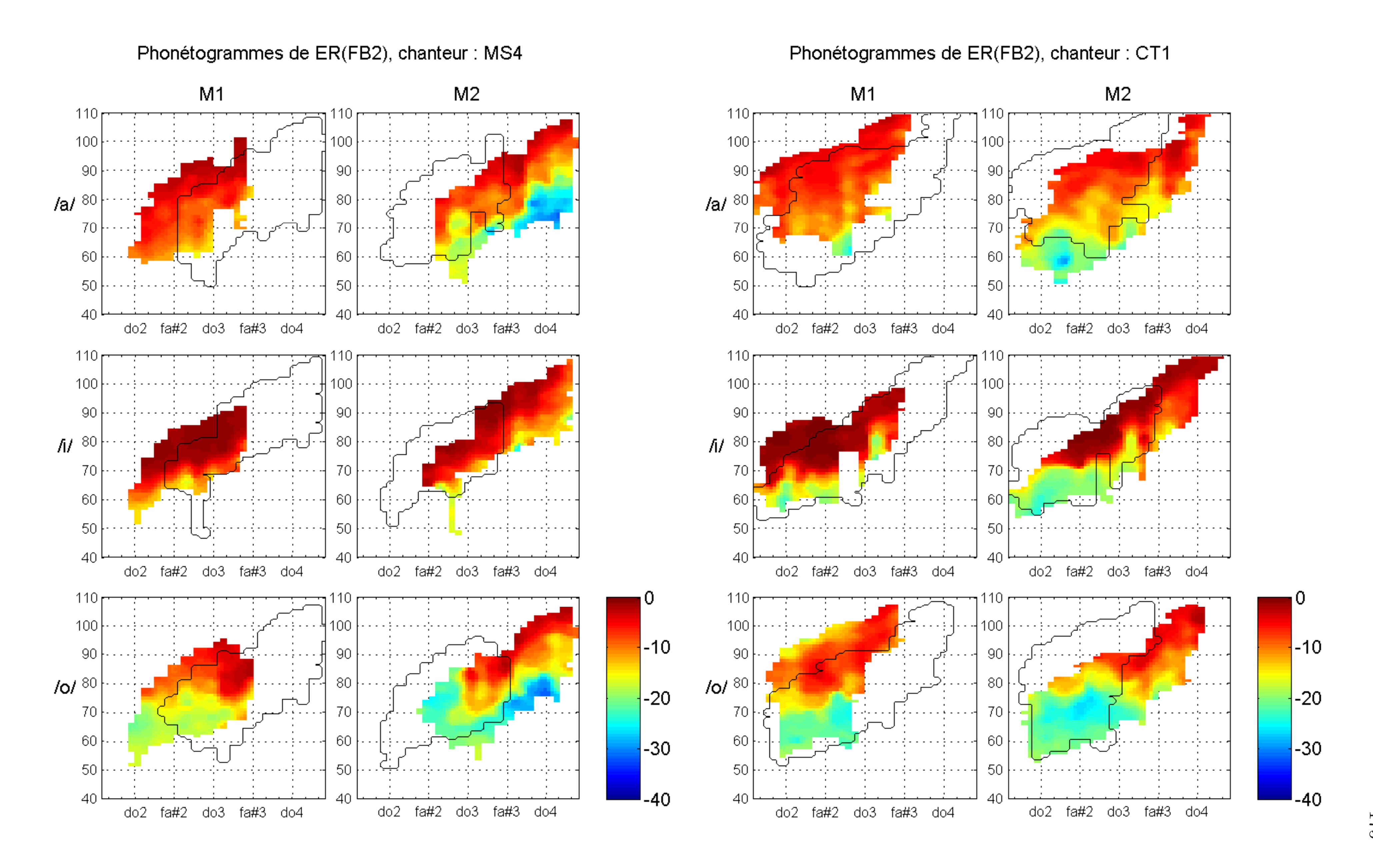


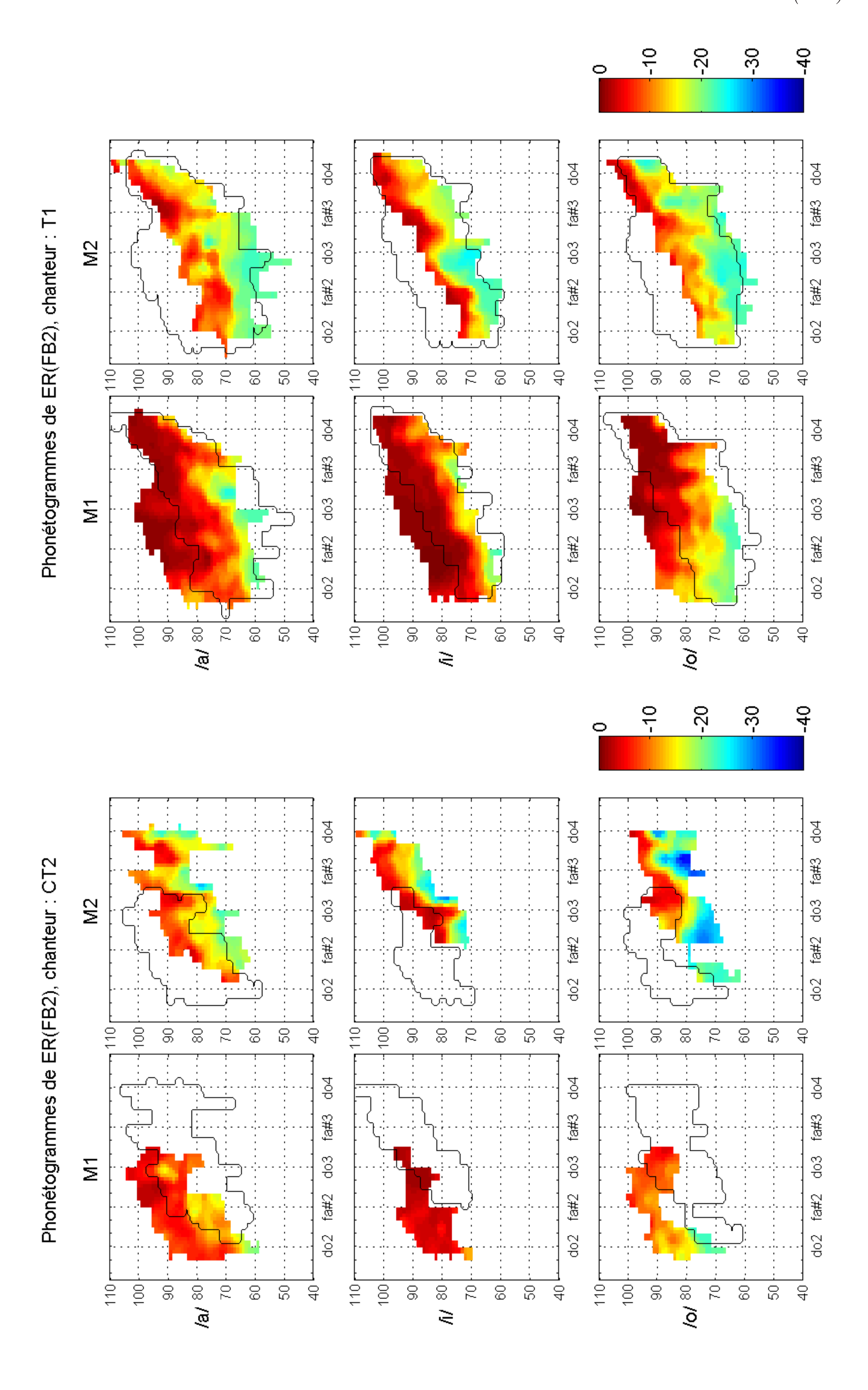
Phonétogrammes de ER(FB2), chanteur : S2
M1
M2
/a/
/i/
/o/
do2 fa#2 do3 fa#3 do4
110 100 90 80 70 60 50 40
0 -10 -20 -30 -40
Phonétogrammes de ER(FB2), chanteur : S3
M1
M2
/a/
/i/
/o/
do2 fa#2 do3 fa#3 do4
110 100 90 80 70 60 50 40
0 -10 -20 -30 -40

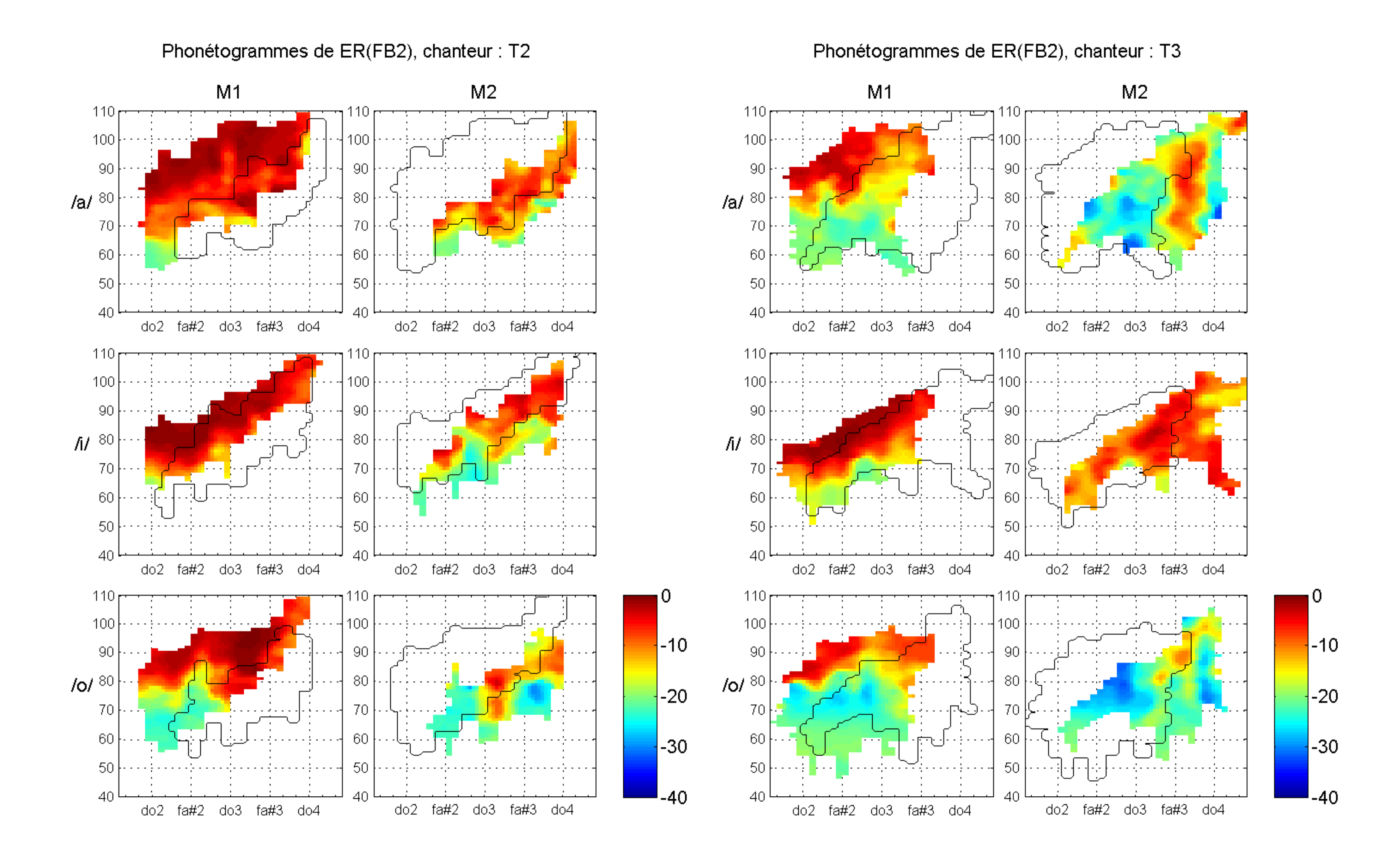


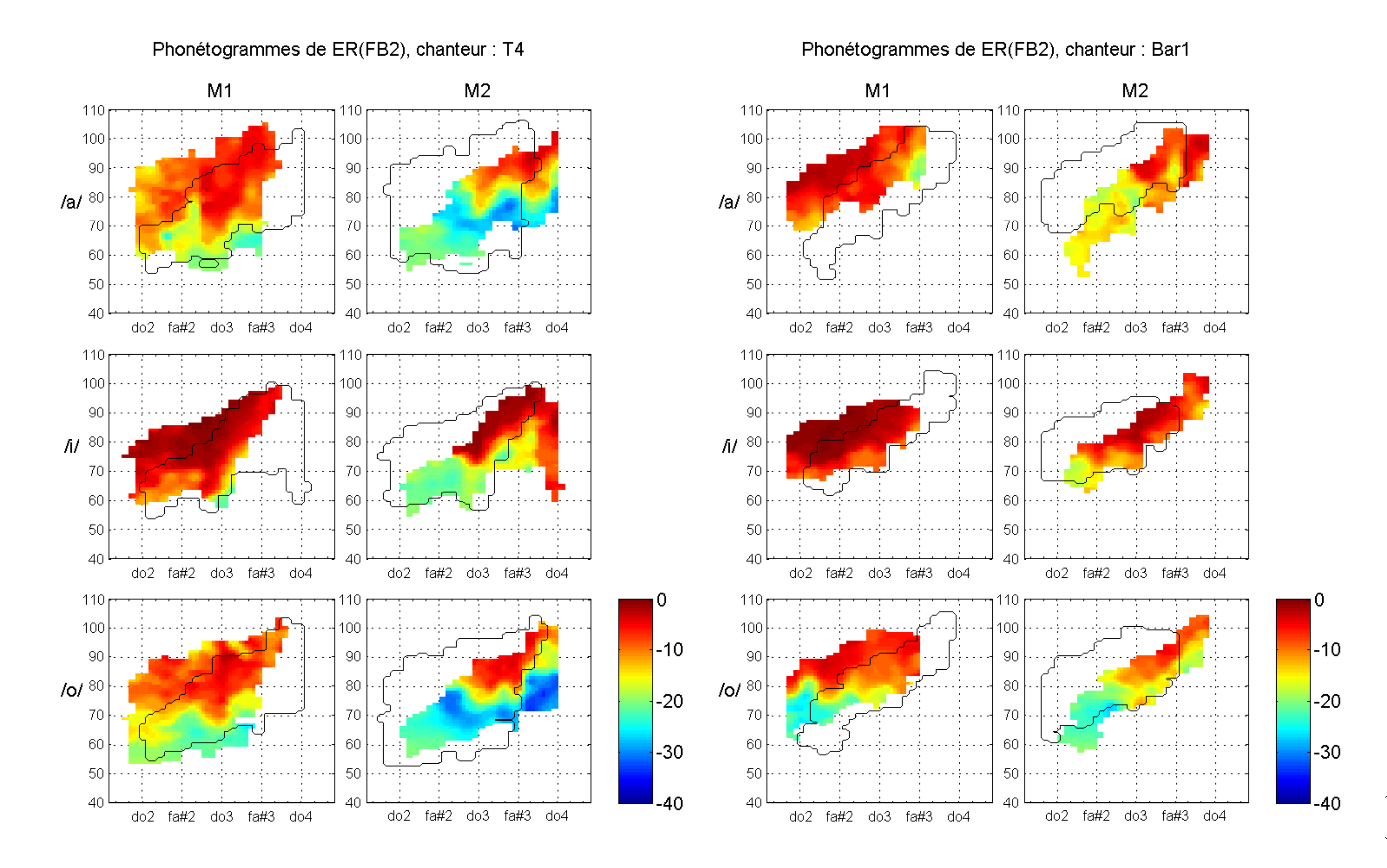
Phonétogrammes de ER(FB2), chanteur : S4
M1
M2
/a/
/i/
/o/
110
100
90
80
70
60
50
40
do2
fa#2
do3
fa#3
do4
0
-10
-20
-30
-40
Phonétogrammes de ER(FB2), chanteur : MS1

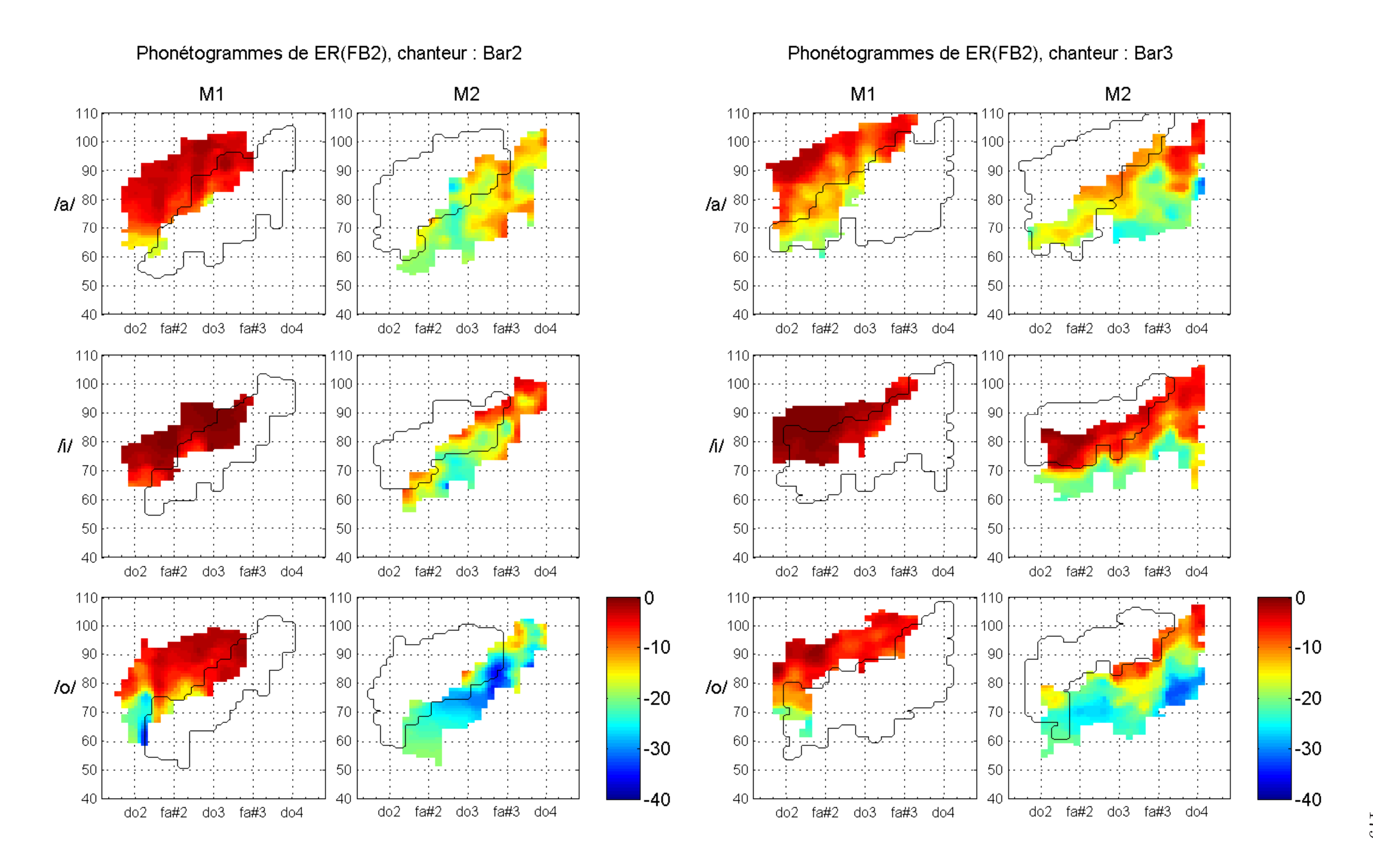

Phonétogrammes de ER(FB2), chanteur : MS2
M1
M2
/a/
/i/
/o/
110
100
90
80
70
60
50
40
do2
fa#2
do3
fa#3
do4
0
-10
-20
-30
-40
Phonétogrammes de ER(FB2), chanteur : MS3


Phonétogrammes de ER(FB2), chanteur : MS4
Phonétogrammes de ER(FB2), chanteur : CT1
M1
M2
/a/
/i/
/o/
110
100
90
80
70
60
50
40
do2
fa#2
do3
fa#3
do4
0
-10
-20
-30
-40

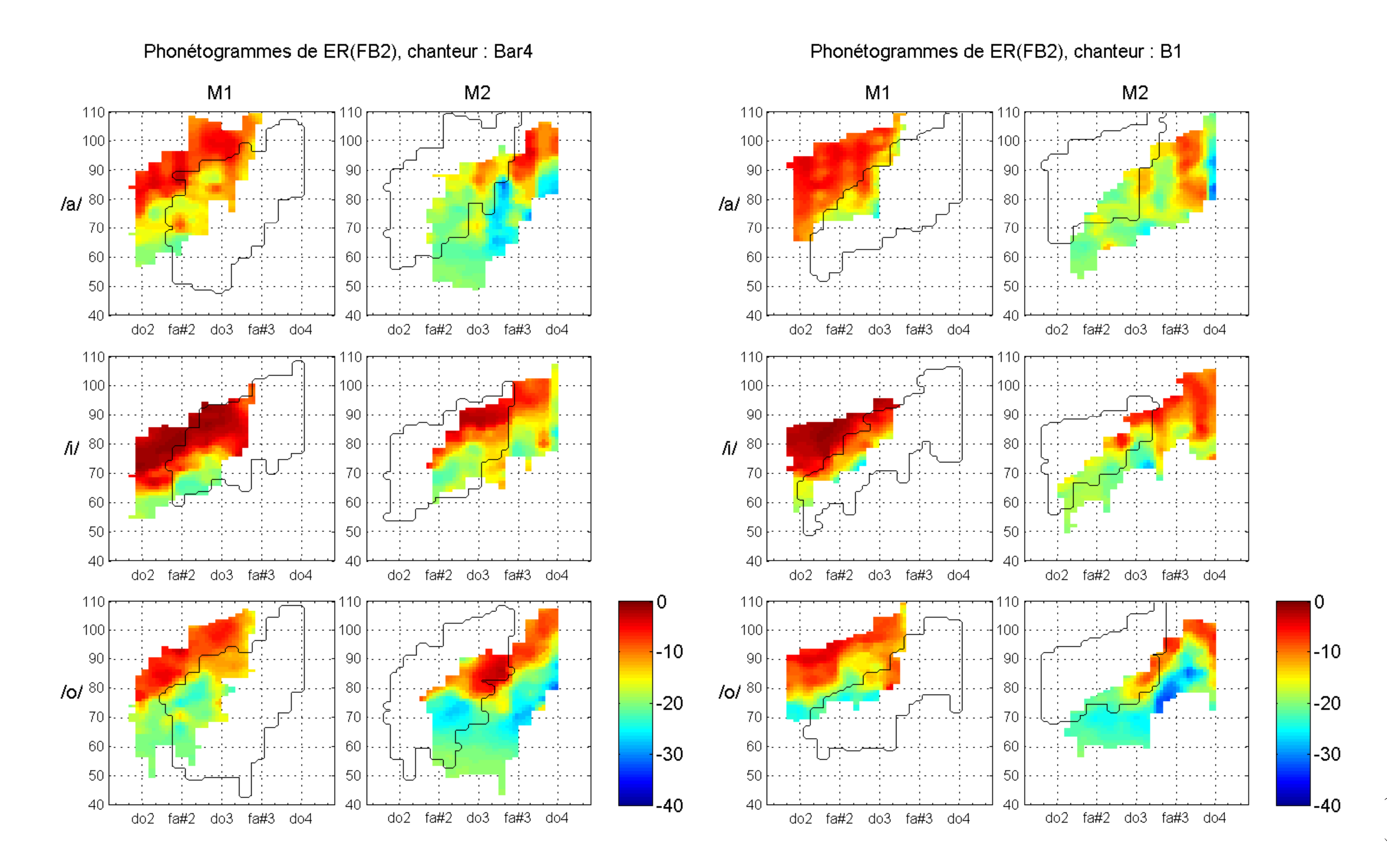

Phonétogrammes de ER(FB2), chanteur : T1
M1
M2
/a/
/i/
/o/
110
100
90
80
70
60
50
40
do2
fa#2
do3
fa#3
do4
0
-10
-20
-30
-40
Phonétogrammes de ER(FB2), chanteur : CT2
M1
M2
/a/
/i/
/o/

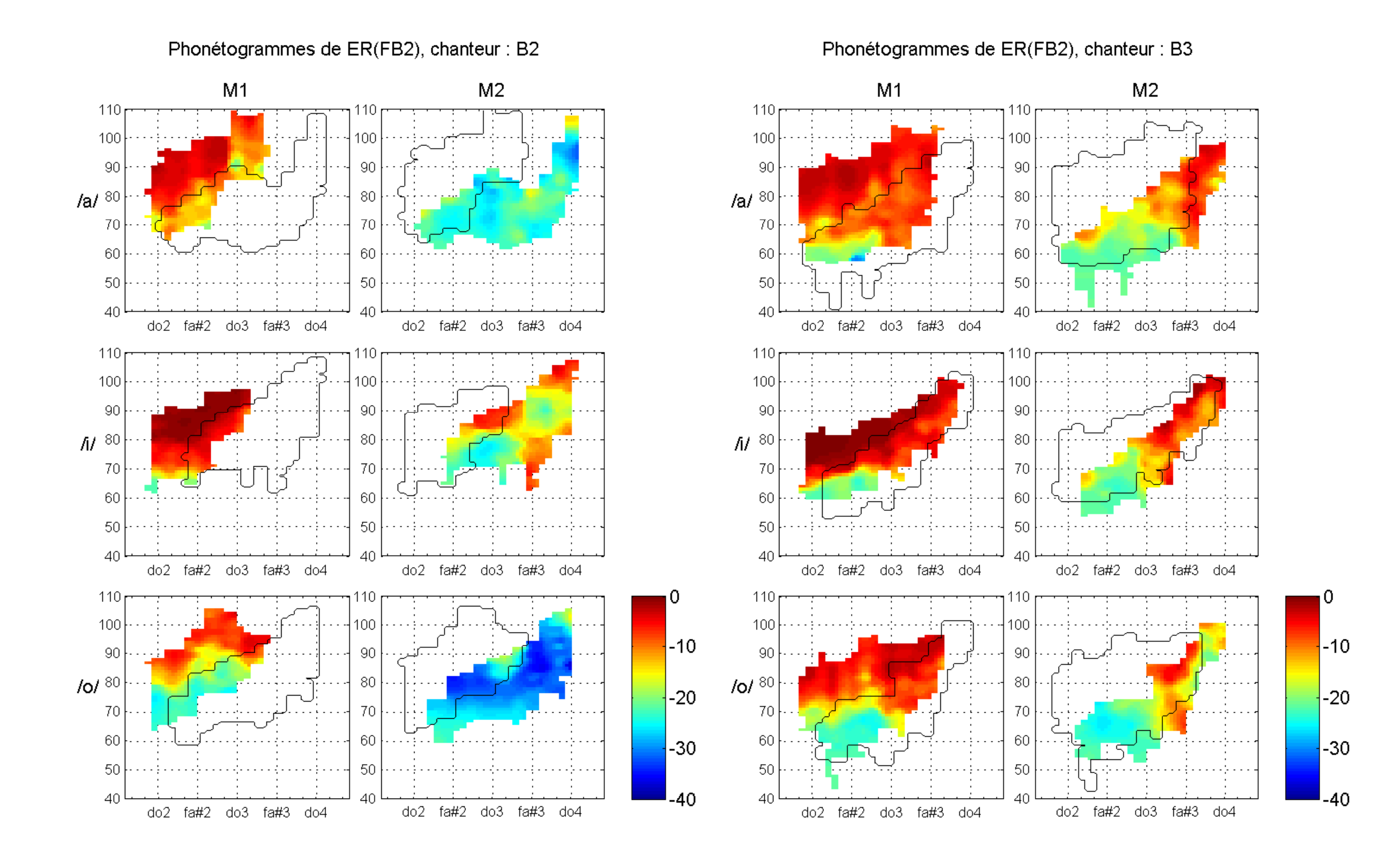

Phonétogrammes de ER(FB2), chanteur : T2
Phonétogrammes de ER(FB2), chanteur : T3
M1
M2
/a/
/i/
/o/
do2 fa#2 do3 fa#3 do4
110 100 90 80 70 60 50 40
0 -10 -20 -30 -40


Phonétogrammes de ER(FB2), chanteur : T4
Phonétogrammes de ER(FB2), chanteur : Bar1
M1
M2
/a/
/i/
/o/
110
100
90
80
70
60
50
40
do2
fa#2
do3
fa#3
do4
0
-10
-20
-30
-40



Phonétogrammes de ER(FB2), chanteur : Bar2
Phonétogrammes de ER(FB2), chanteur : Bar3
M1
M2
/a/
/i/
/o/
110 100 90 80 70 60 50 40
do2 fa#2 do3 fa#3 do4
0 -10 -20 -30 -40

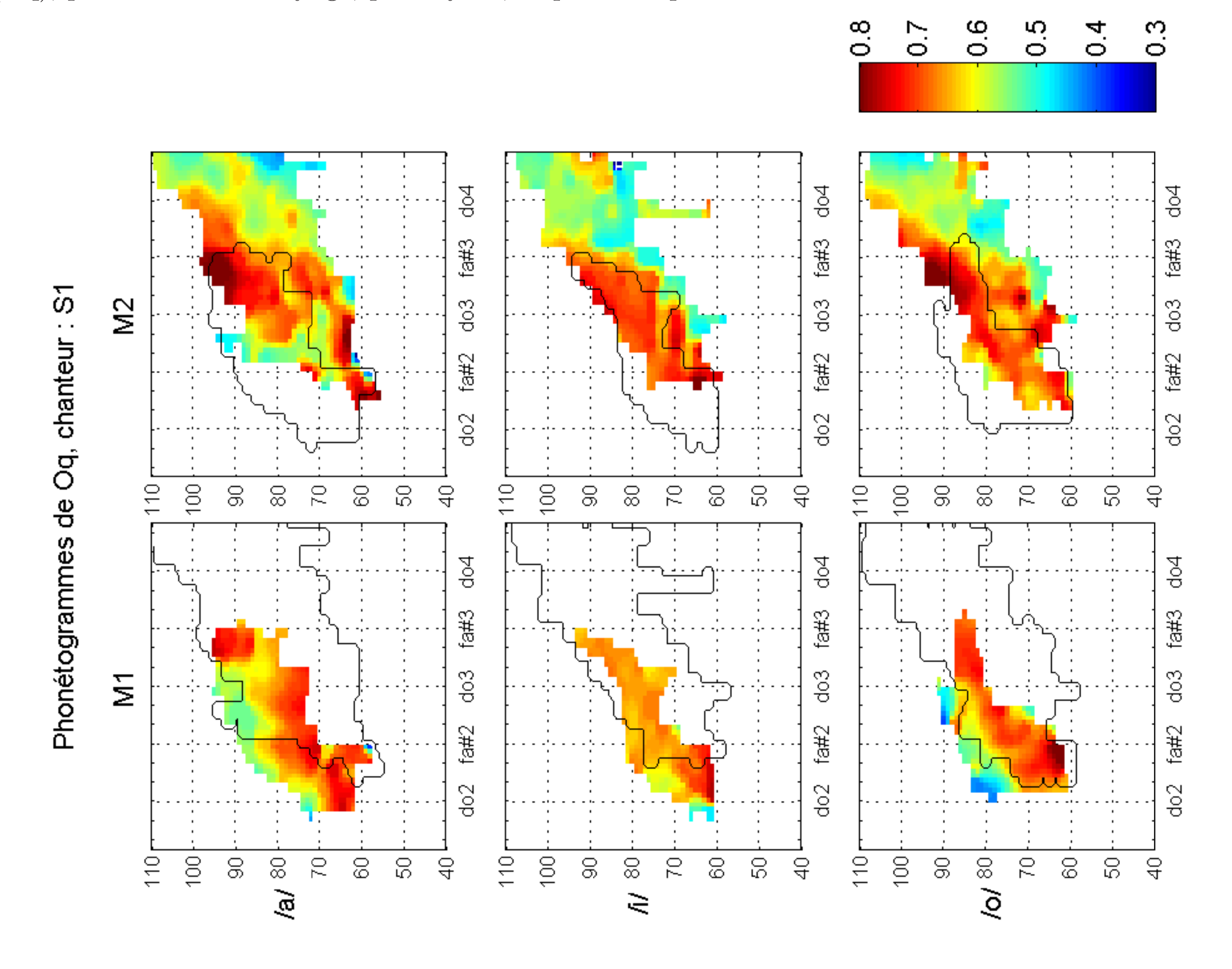

Phonétogrammes de ER(FB2), chanteur : Bar4
M1
M2
/a/
/i/
/o/
110
100
90
80
70
60
50
40
do2
fa#2
do3
fa#3
do4
0
-10
-20
-30
-40
Phonétogrammes de ER(FB2), chanteur : B1

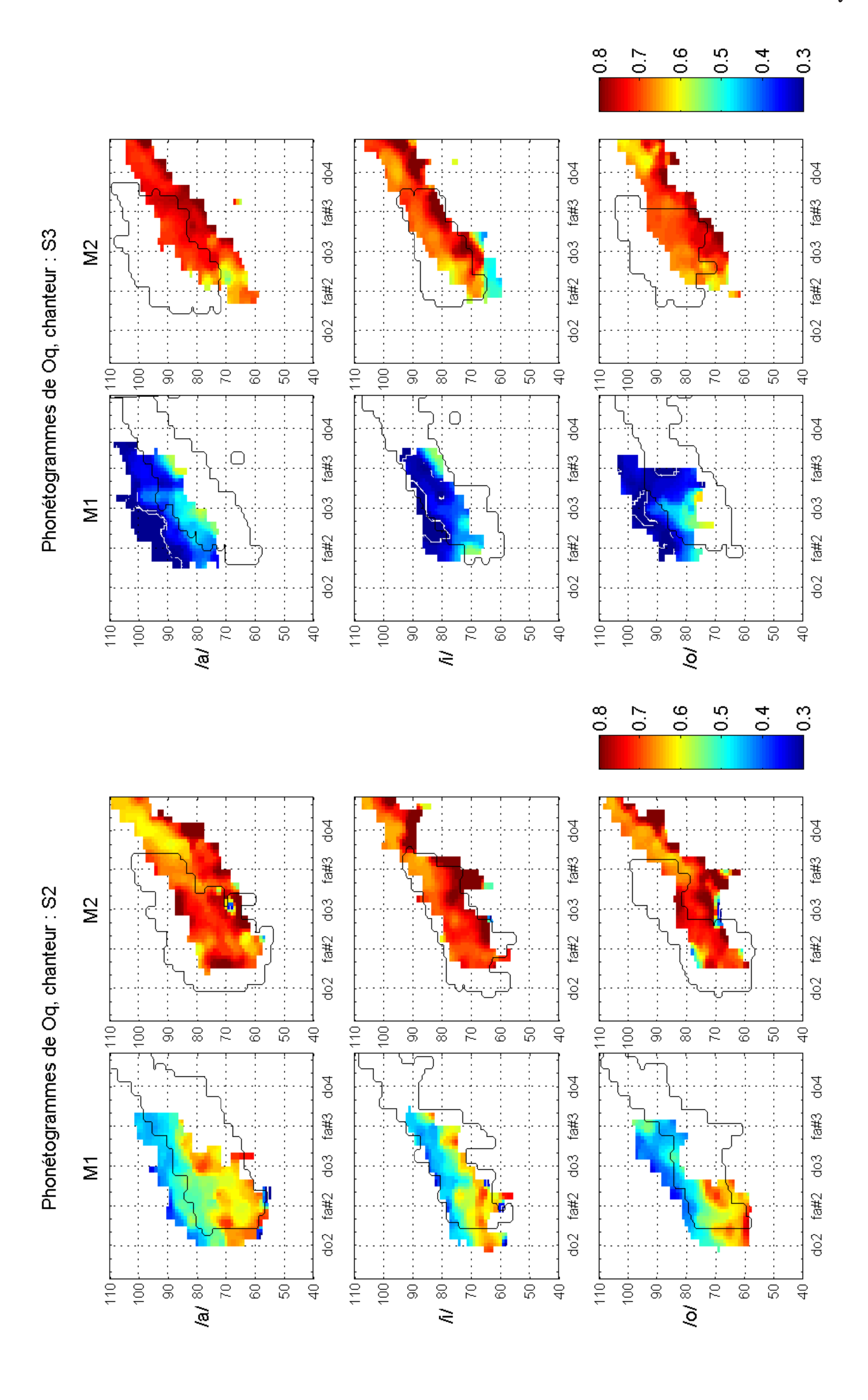

Phonétogrammes de ER(FB2), chanteur : B2
Phonétogrammes de ER(FB2), chanteur : B3
M1
M2
/a/
/i/
/o/
110 100 90 80 70 60 50 40
do2 fa#2 do3 fa#3 do4
0 -10 -20 -30 -40

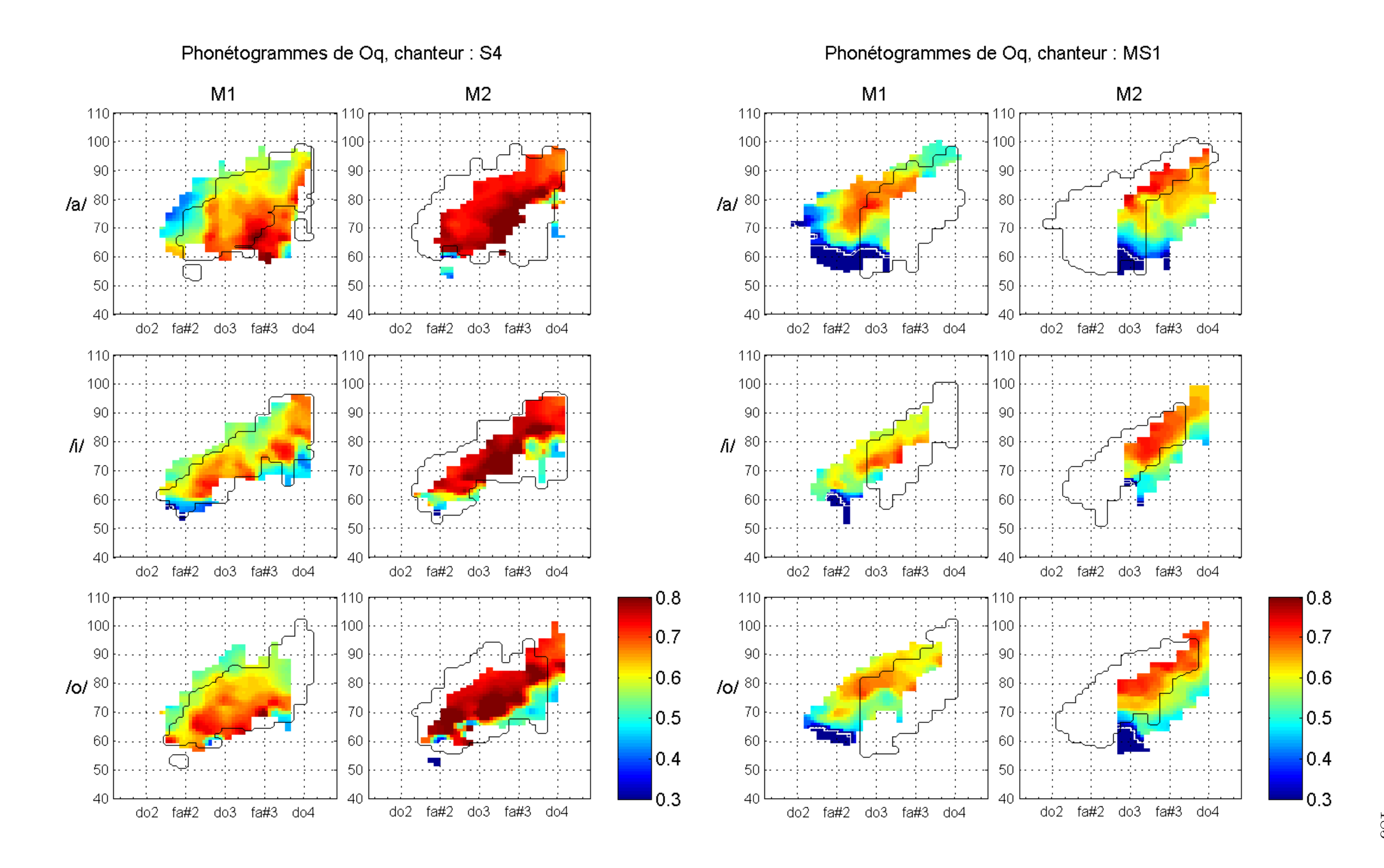
# Annexe D

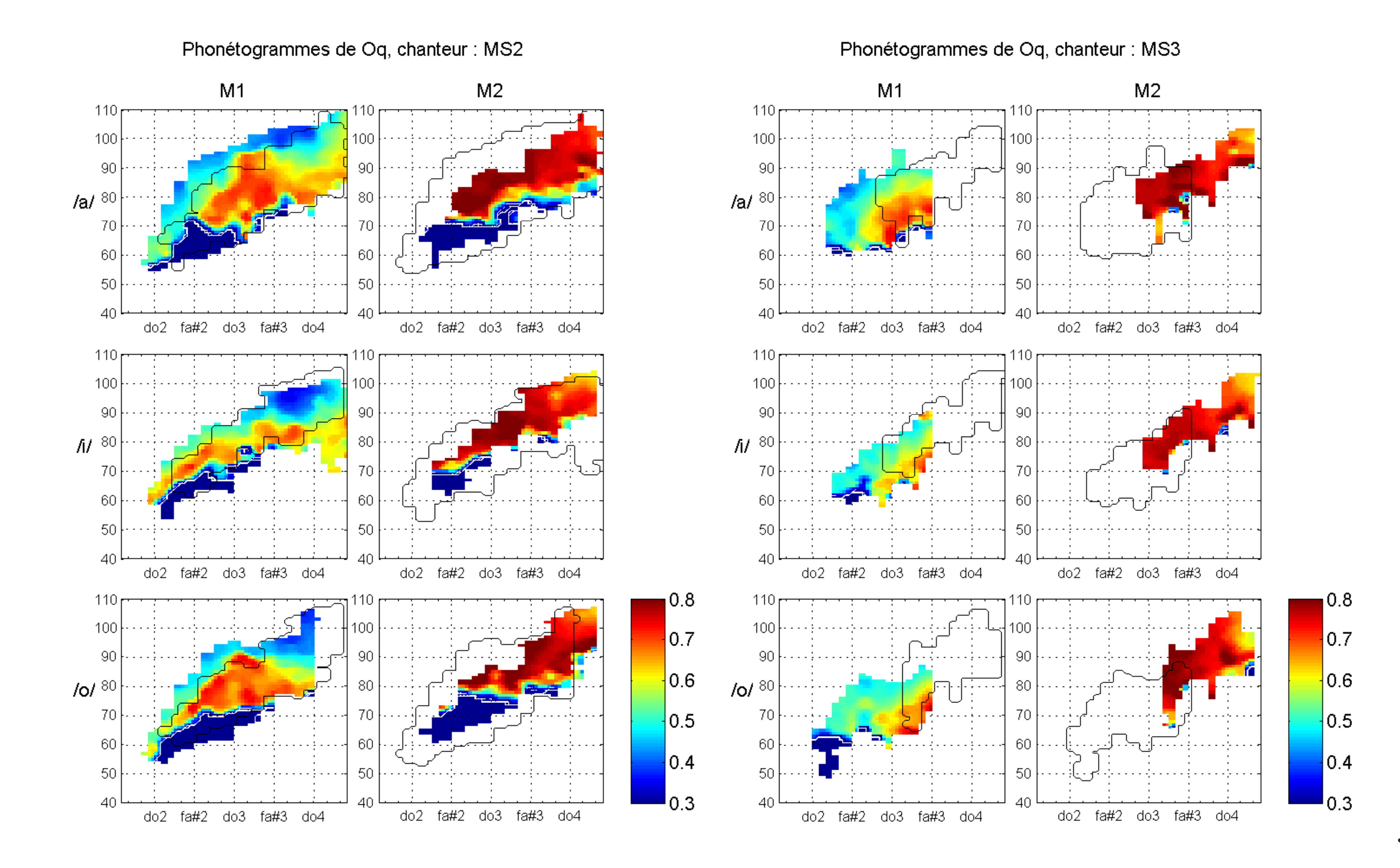
# Phonétogrammes de Oq

Dans l'ensemble de cette annexe, nous présentons les phonétogrammes de quotient ouvert (Oq), par mécanisme laryngé, par voyelle, et pour chaque chanteur.

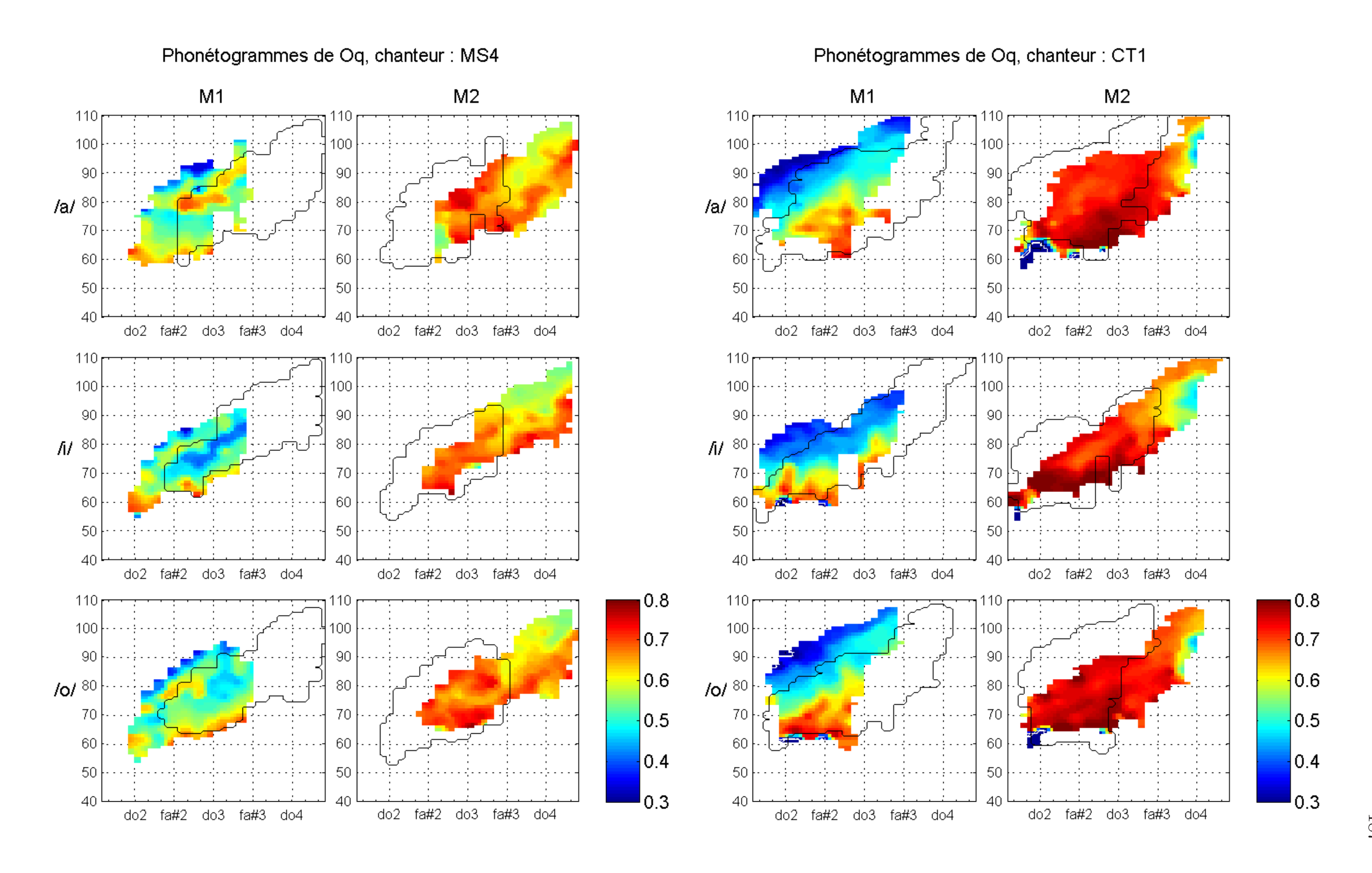



Phonétogrammes de Oq, chanteur : S2
M1
M2
/a/
/i/
/o/
do2
fa#2
do3
fa#3
do4
110
100
90
80
70
60
50
40
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
Phonétogrammes de Oq, chanteur : S3
M1
M2
/a/
/i/
/o/
do2
fa#2
do3
fa#3
do4
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3

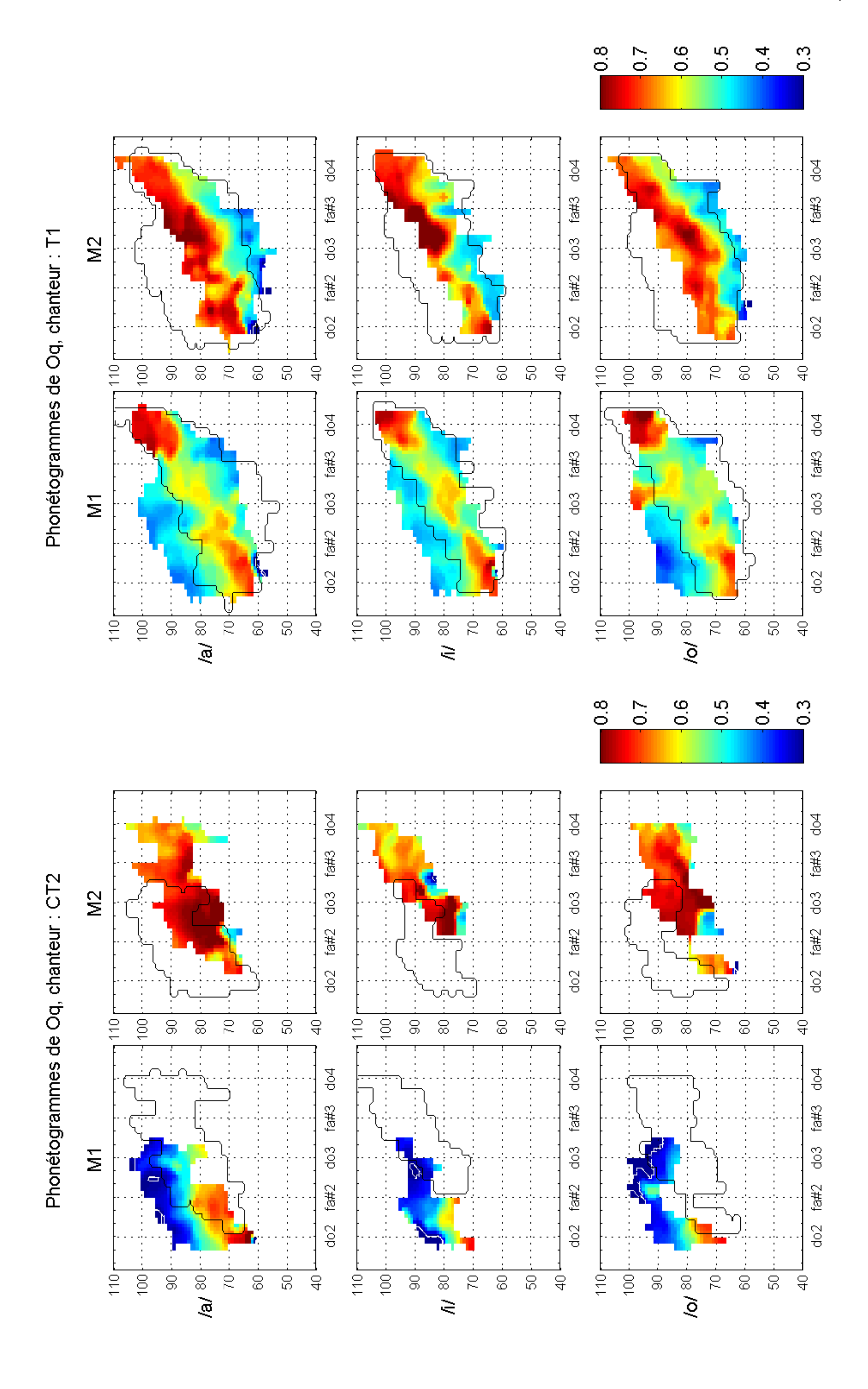

Phonétogrammes de Oq, chanteur : S4
Phonétogrammes de Oq, chanteur : MS1
M1
M2
/a/
/i/
/o/
do2 fa#2 do3 fa#3 do4
110 100 90 80 70 60 50 40
0.8 0.7 0.6 0.5 0.4 0.3

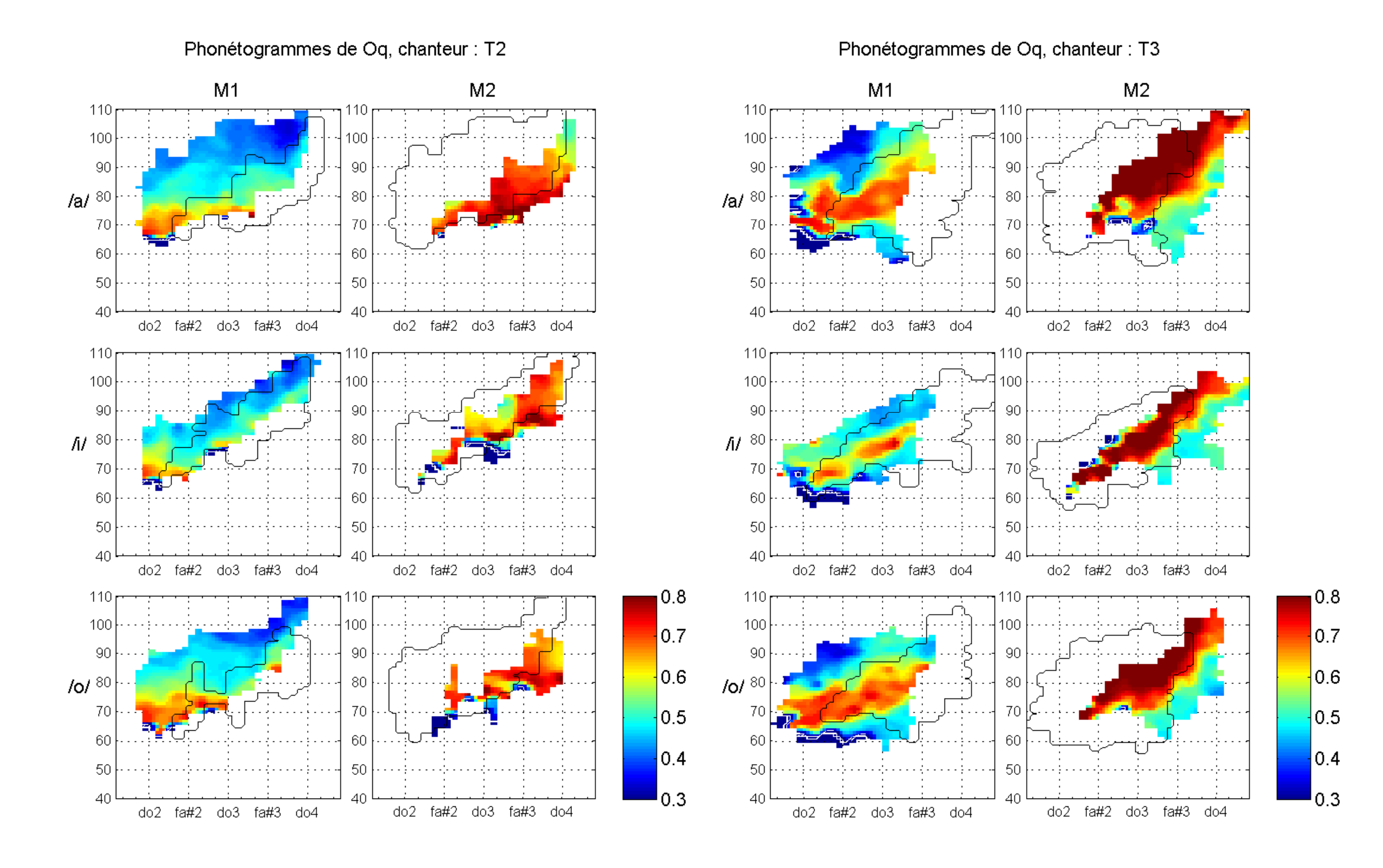


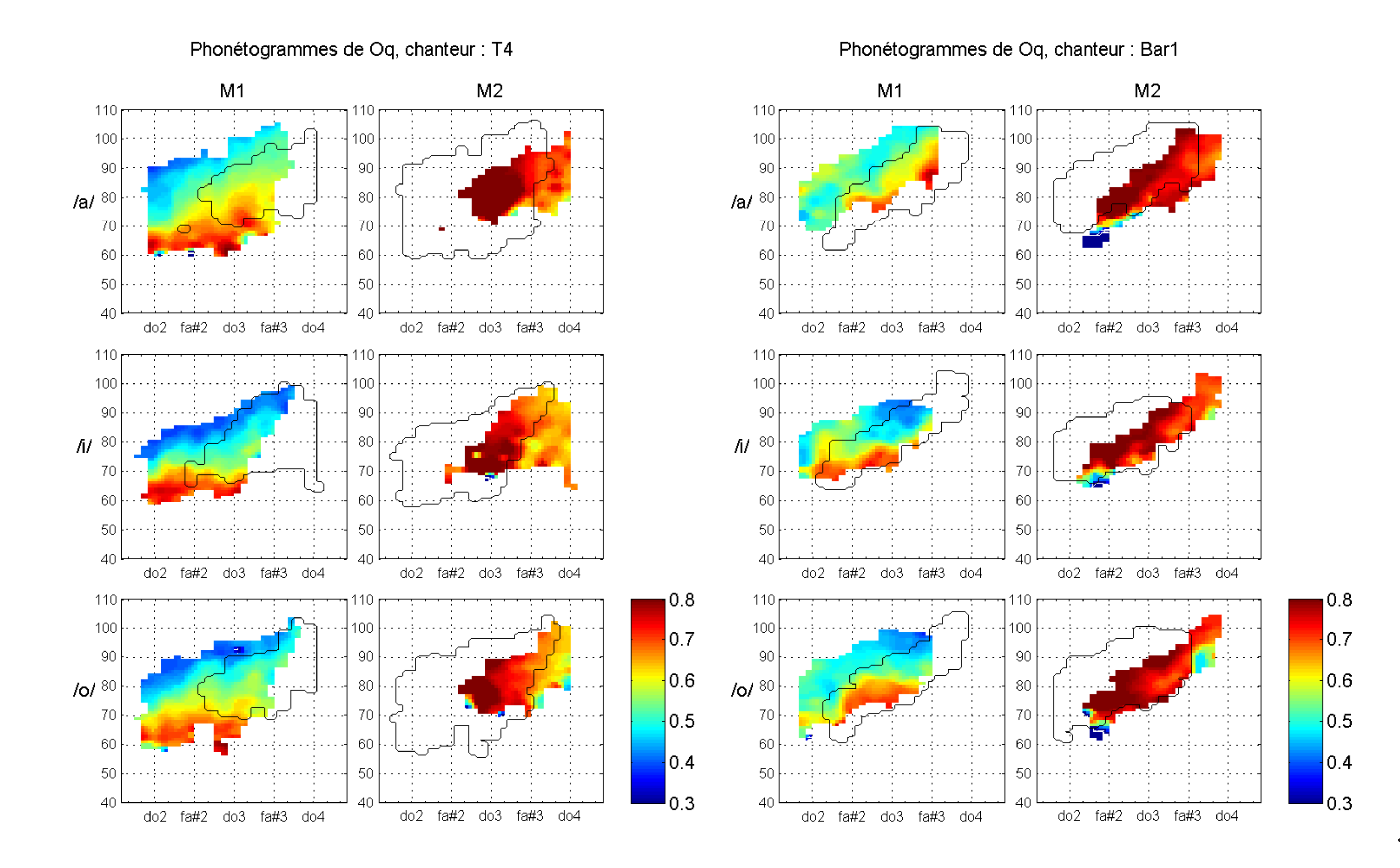
Phonétogrammes de Oq, chanteur : MS2
M1
M2
/a/
/i/
/o/
do2
fa#2
do3
fa#3
do4
110
100
90
80
70
60
50
40
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
Phonétogrammes de Oq, chanteur : MS3

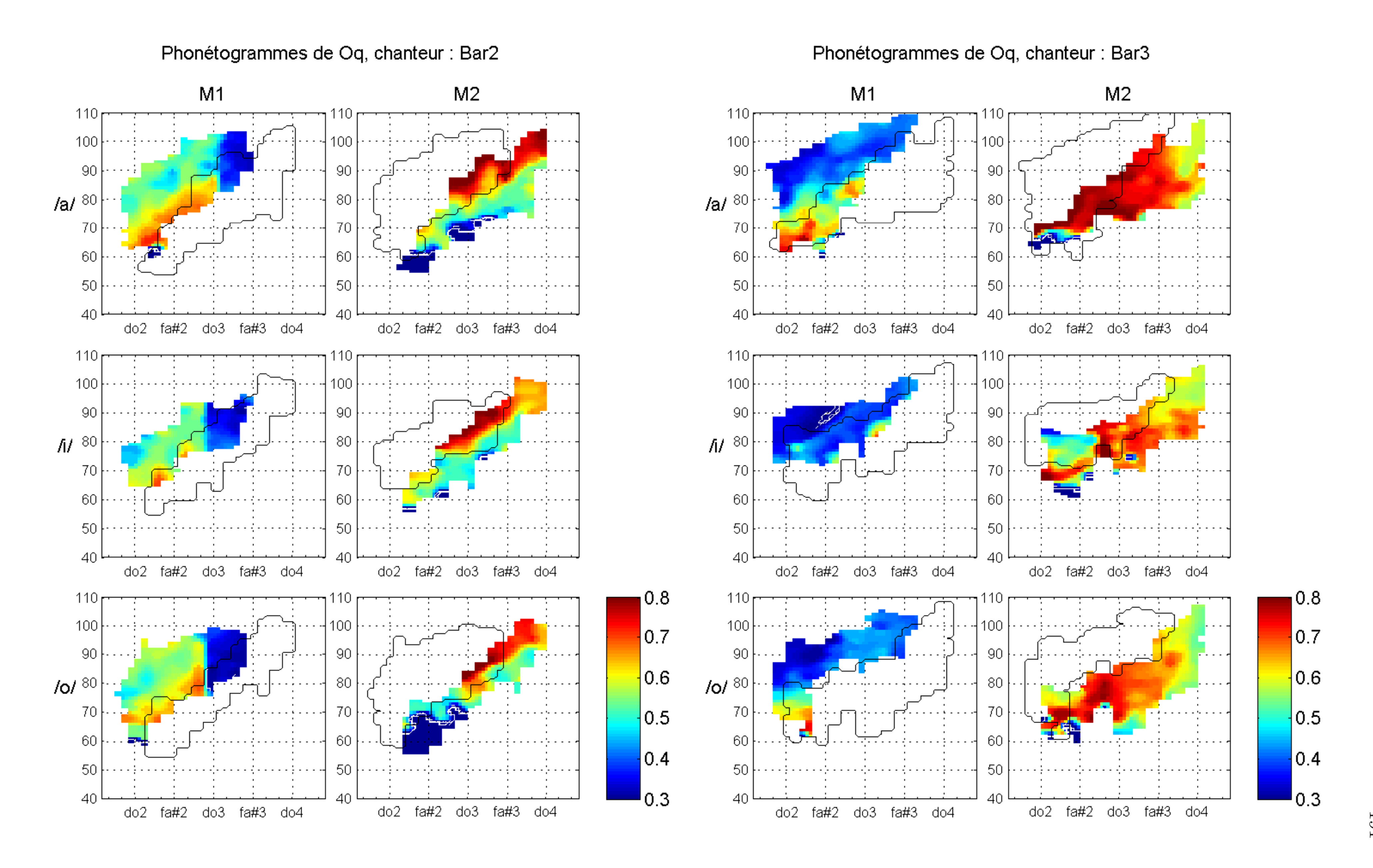


Phonétogrammes de Oq, chanteur : MS4
M1
M2
/a/
/i/
/o/
110
100
90
80
70
60
50
40
do2
fa#2
do3
fa#3
do4
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
Phonétogrammes de Oq, chanteur : CT1

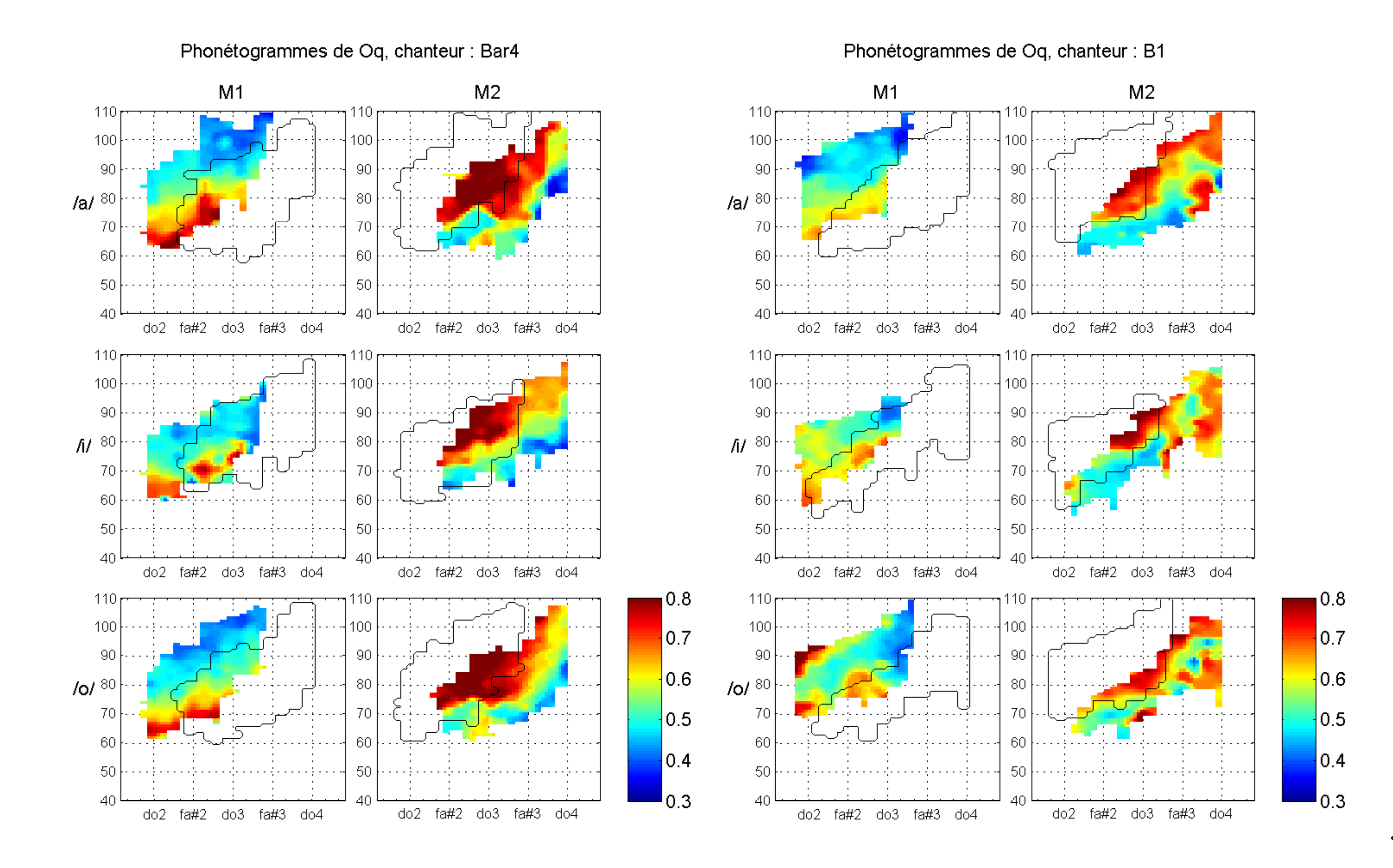

Phonétogrammes de Oq, chanteur : CT2
M1
M2
/a/
/i/
/o/
110
100
90
80
70
60
50
40
do2
fa#2
do3
fa#3
do4
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
Phonétogrammes de Oq, chanteur : T1


Phonétogrammes de Oq, chanteur : T2
M1
M2
/a/
/i/
/o/
110
100
90
80
70
60
50
40
do2
fa#2
do3
fa#3
do4
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
Phonétogrammes de Oq, chanteur : T3
M1
M2
/a/
/i/
/o/
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3

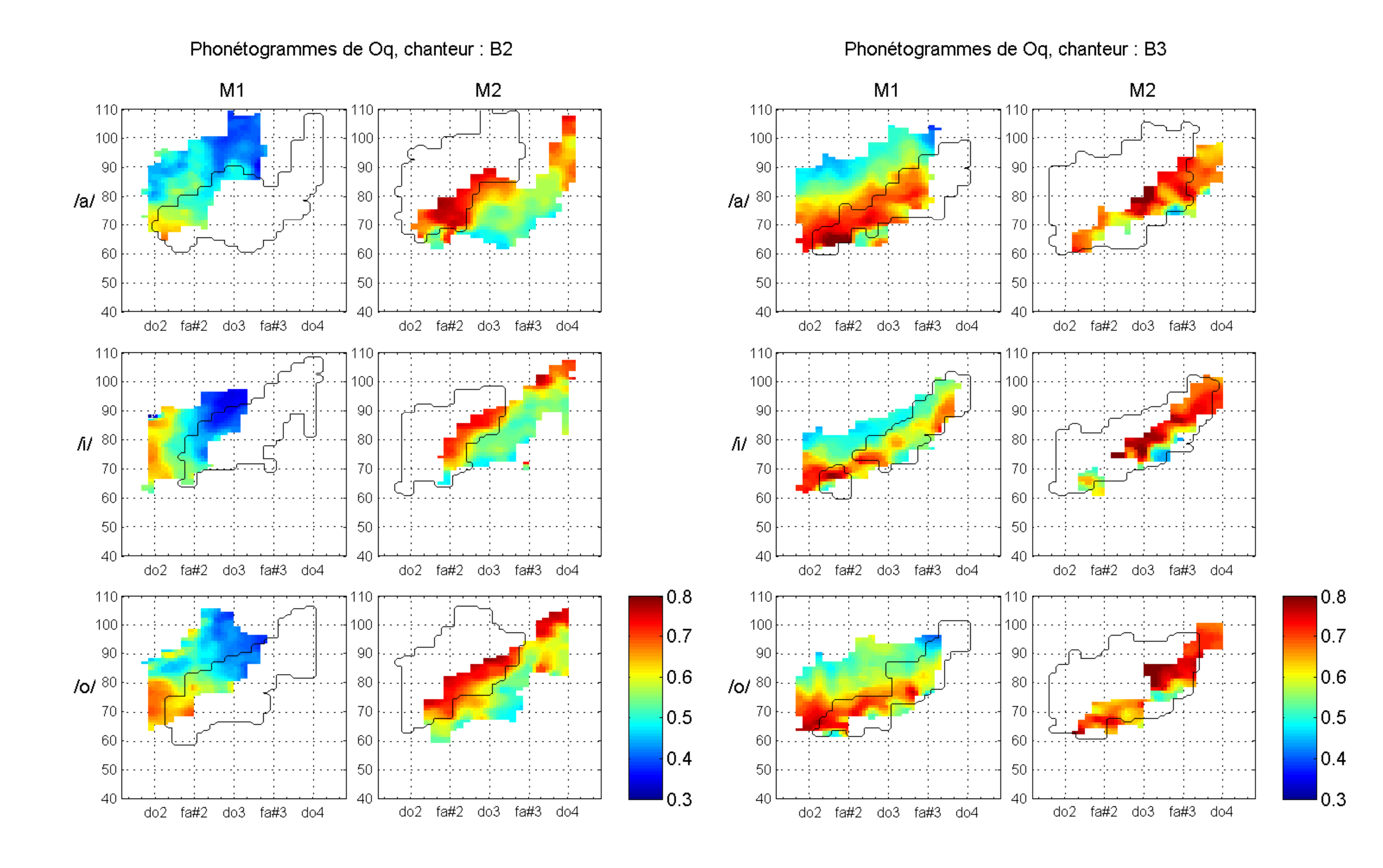

Phonétogrammes de Oq, chanteur : T4
M1
M2
/a/
/i/
/o/
do2
fa#2
do3
fa#3
do4
110
100
90
80
70
60
50
40
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
Phonétogrammes de Oq, chanteur : Bar1



Phonétogrammes de Oq, chanteur : Bar2
Phonétogrammes de Oq, chanteur : Bar3
M1
M2
/a/
/i/
/o/
do2
fa#2
do3
fa#3
do4
110
100
90
80
70
60
50
40
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3



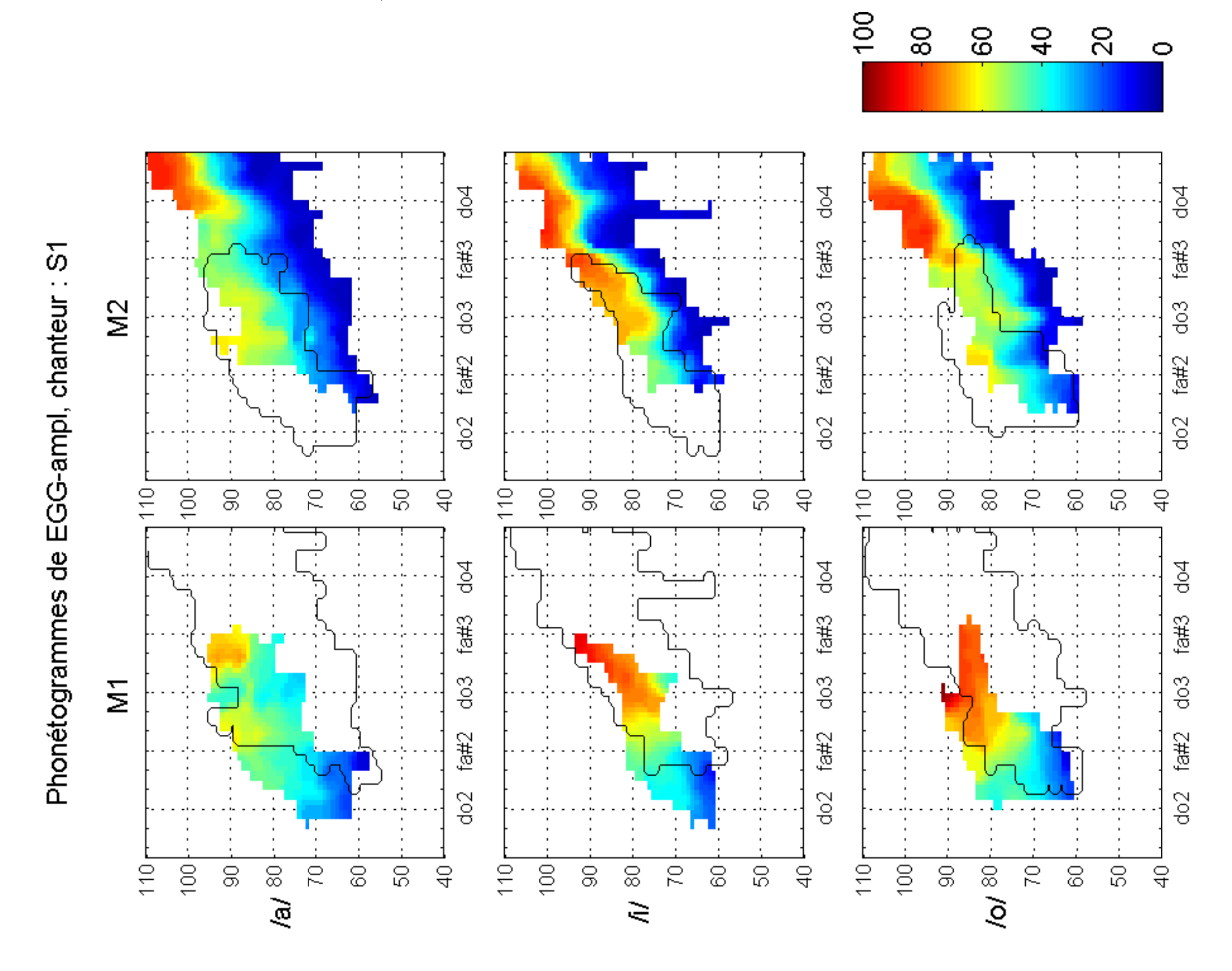
Phonétogrammes de Oq, chanteur : Bar4
Phonétogrammes de Oq, chanteur : B1
M1
M2
/a/
/i/
/o/
110 100 90 80 70 60 50 40
do2 fa#2 do3 fa#3 do4
0.8 0.7 0.6 0.5 0.4 0.3

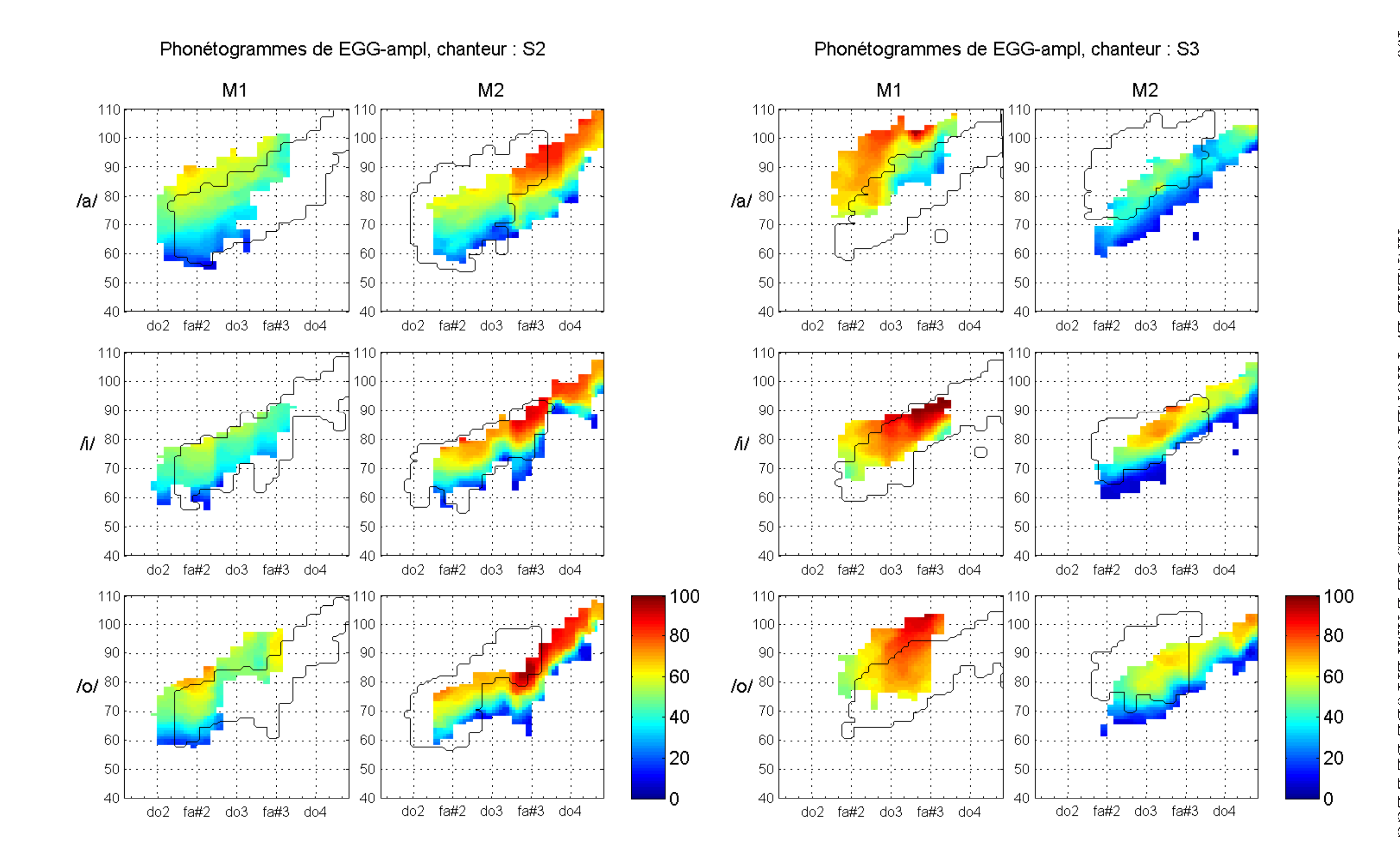

Phonétogrammes de Oq, chanteur : B2
Phonétogrammes de Oq, chanteur : B3
M1
M2
/a/
/i/
/o/
110
100
90
80
70
60
50
40
do2
fa#2
do3
fa#3
do4
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3

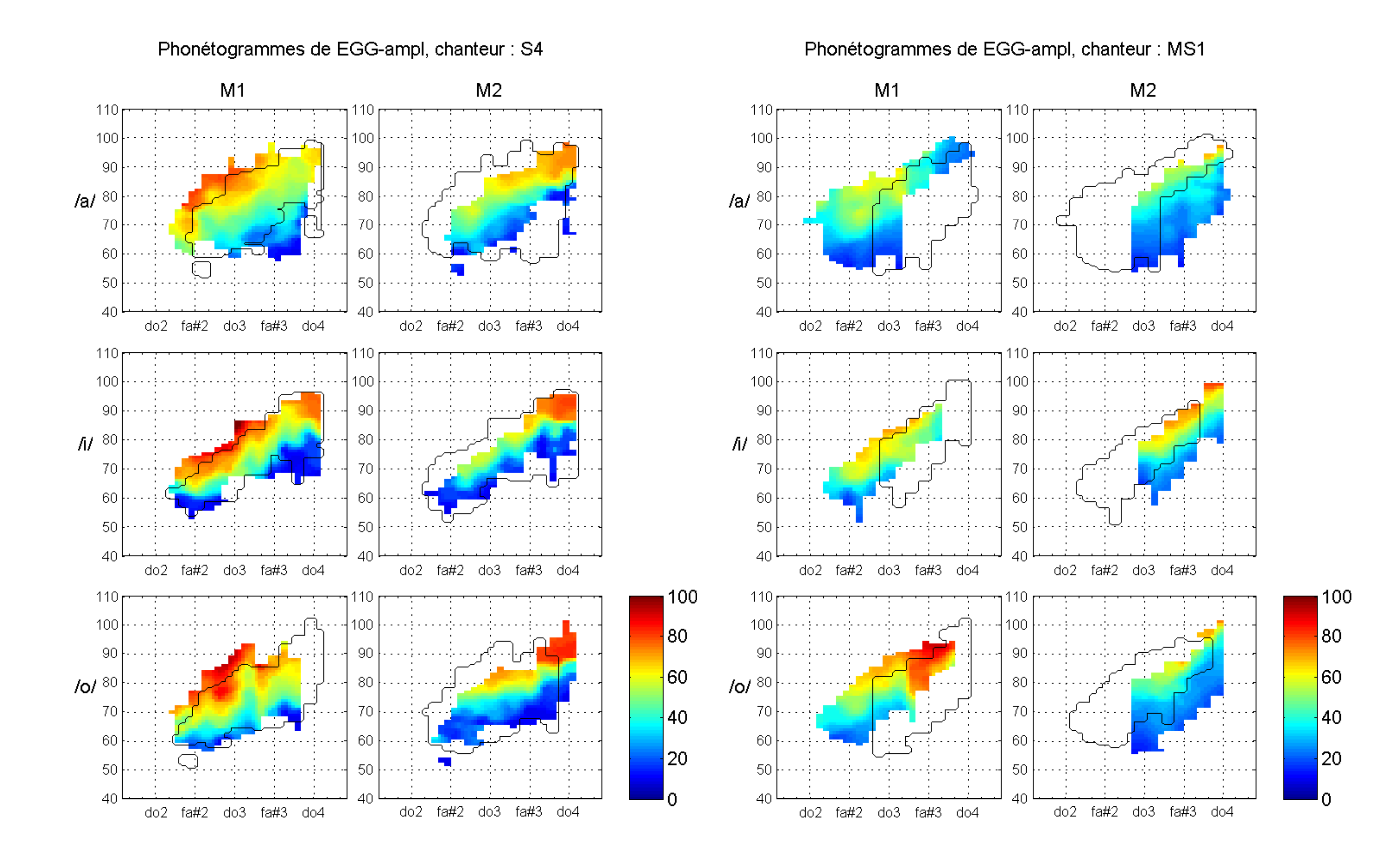
# Annexe E

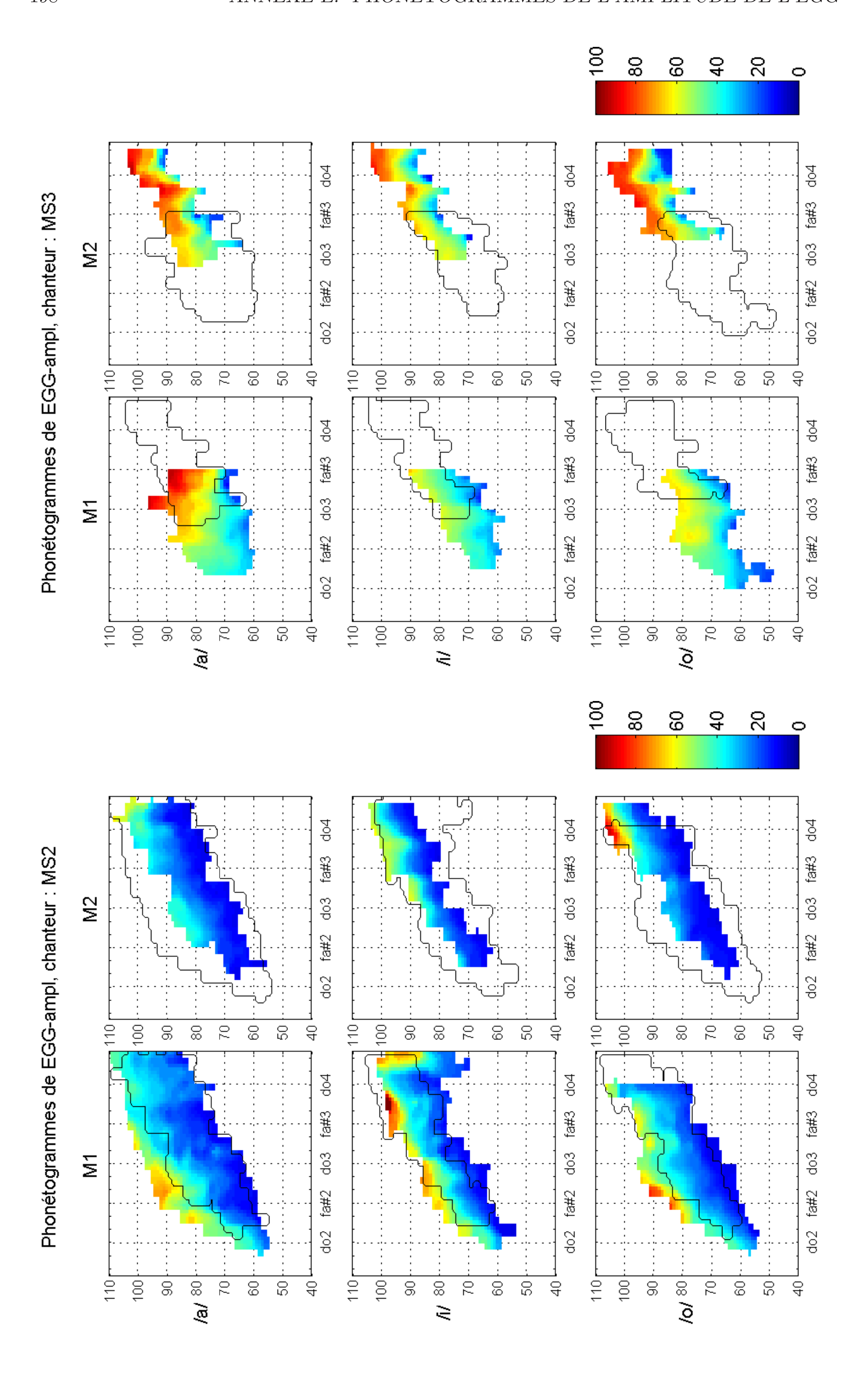
# Phonétogrammes de l'amplitude de l'EGG

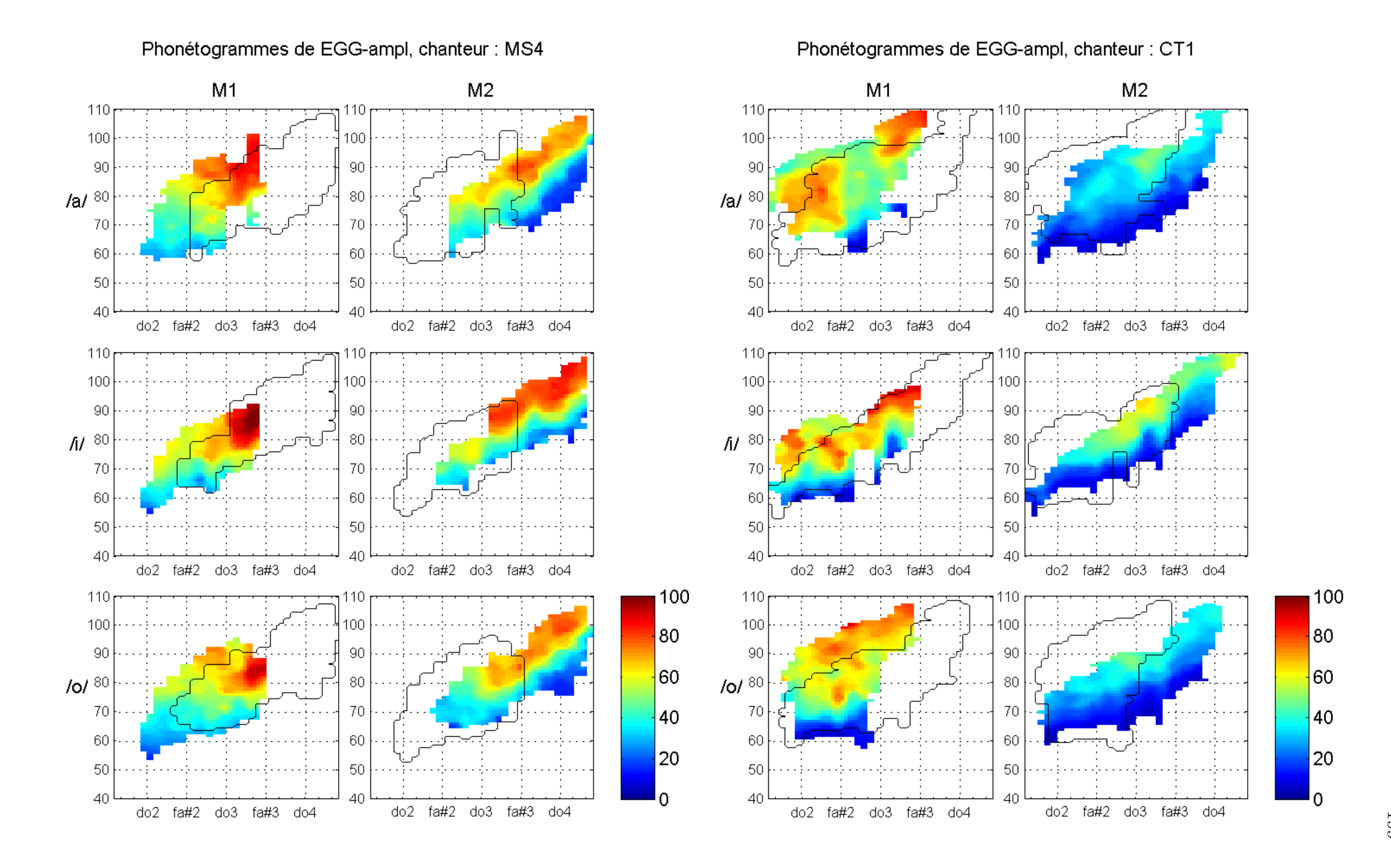
Dans l'ensemble de cette annexe, nous présentons les phonétogrammes d'amplitude du signal EGG, par mécanisme laryngé, par voyelle, et pour chaque chanteur. L'amplitude de l'EGG est normalisée, de 0 à 100 % (100 % correspondant à l'amplitude maximale observée, pour chaque chanteur, au cours de la session).

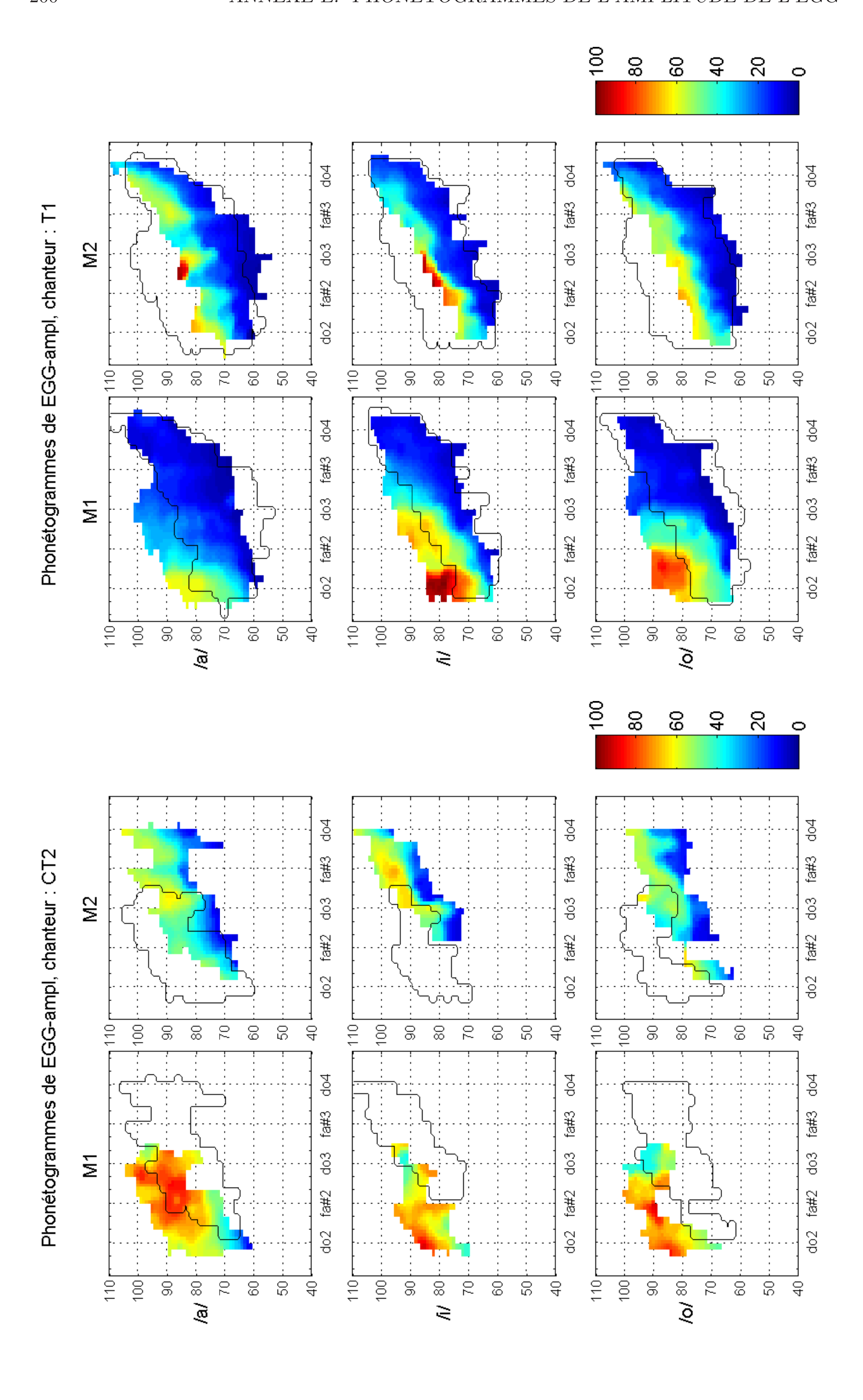



Phonétogrammes de EGG-ampl, chanteur : S2
Phonétogrammes de EGG-ampl, chanteur : S3
M1
M2
/a/
/i/
/o/
do2
fa#2
do3
fa#3
do4
110
100
90
80
70
60
50
40
100
80
60
40
20
0

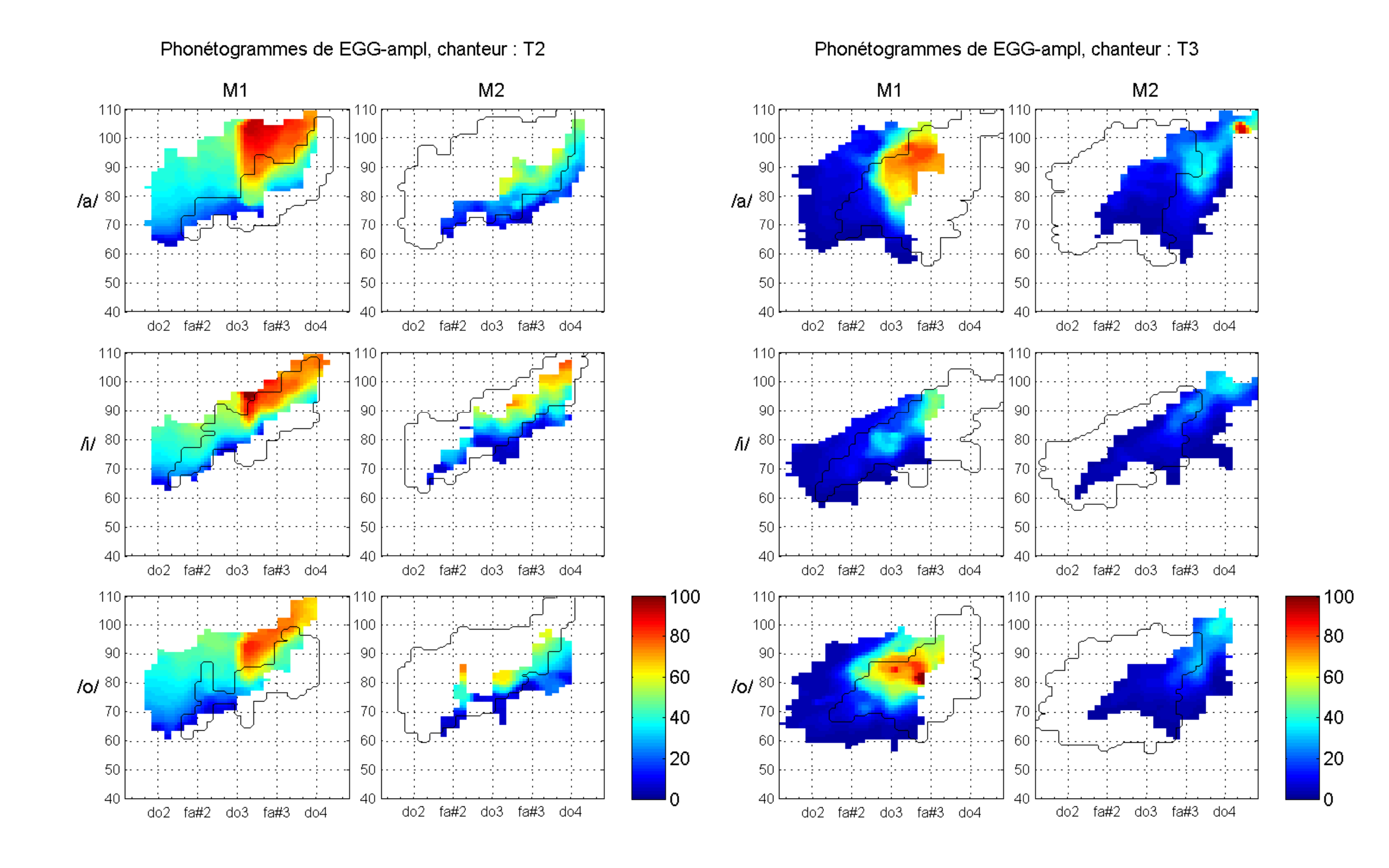

Phonétogrammes de EGG-ampl, chanteur : S4
M1
M2
Phonétogrammes de EGG-ampl, chanteur : MS1
M1
M2
/a/
/i/
/o/
110
100
90
80
70
60
50
40
do2
fa#2
do3
fa#3
do4
100
80
60
40
20
0

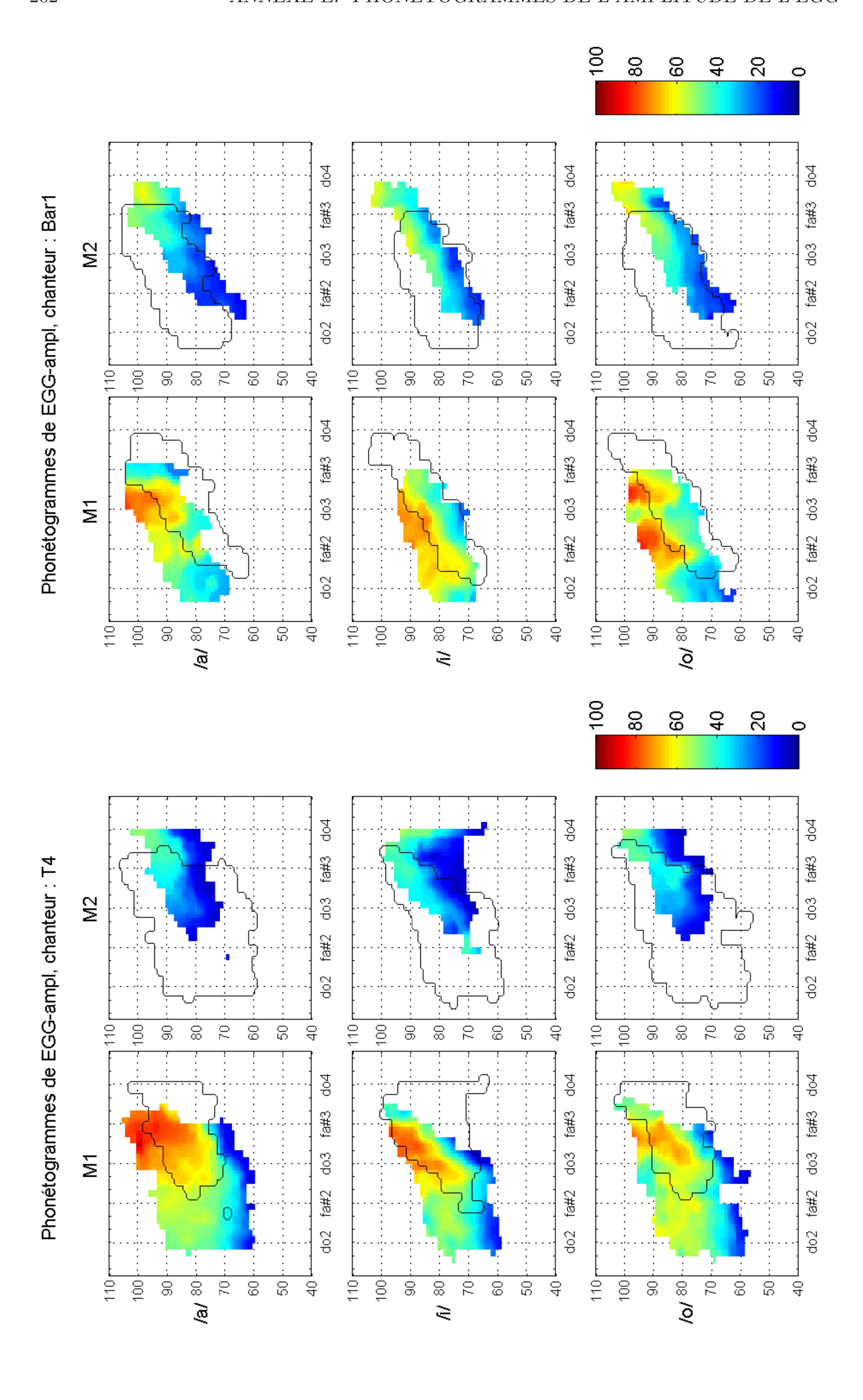

Phonétogrammes de EGG-ampl, chanteur : MS2
Phonétogrammes de EGG-ampl, chanteur : MS3
M1
M2
/a/
/i/
/o/
110 100 90 80 70 60 50 40
do2 fa#2 do3 fa#3 do4
100 80 60 40 20 0

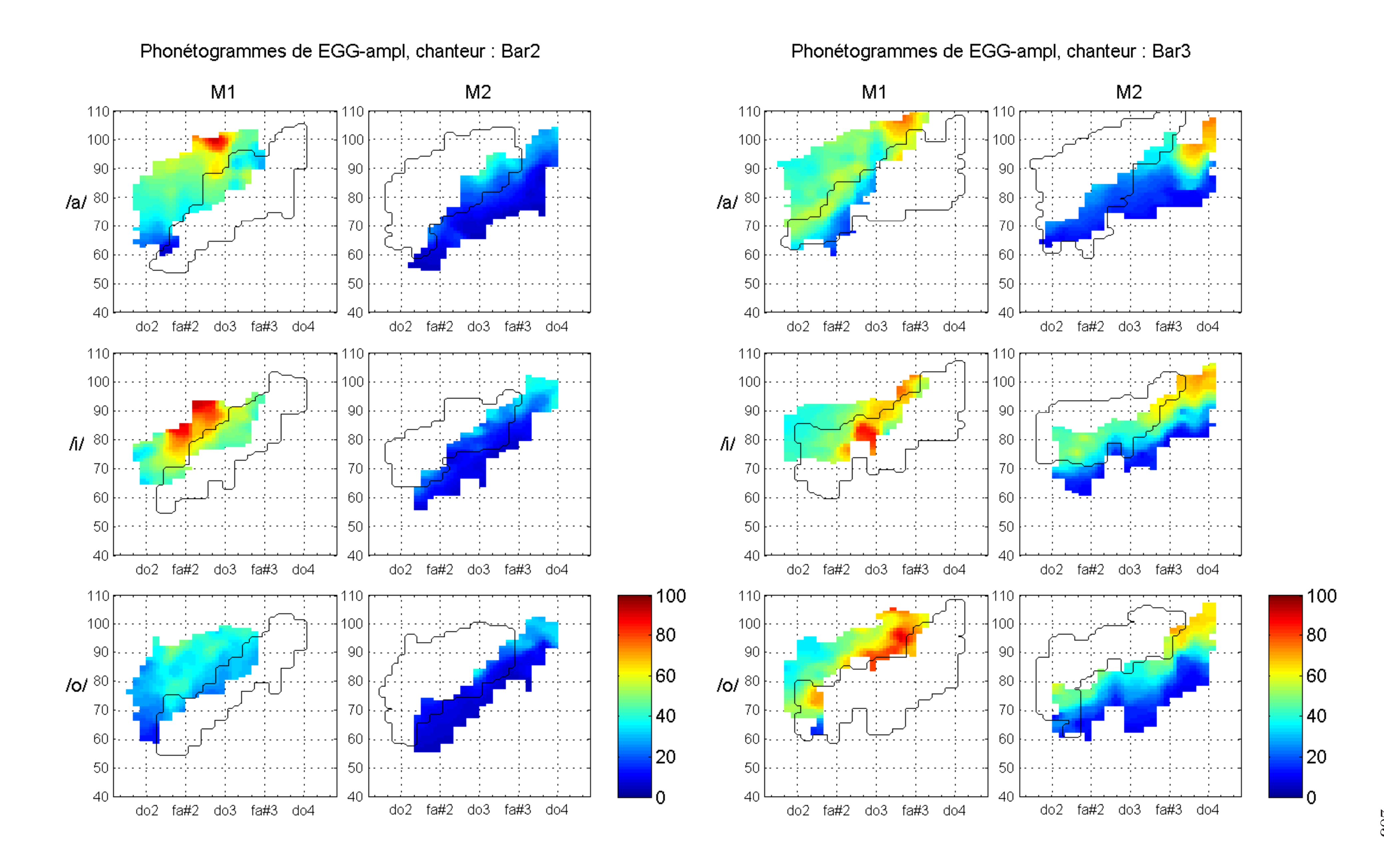

Phonétogrammes de EGG-ampl, chanteur : MS4
M1
M2
/a/
/i/
/o/
110
100
90
80
70
60
50
40
do2
fa#2
do3
fa#3
do4
100
80
60
40
20
0
Phonétogrammes de EGG-ampl, chanteur : CT1
M1
M2

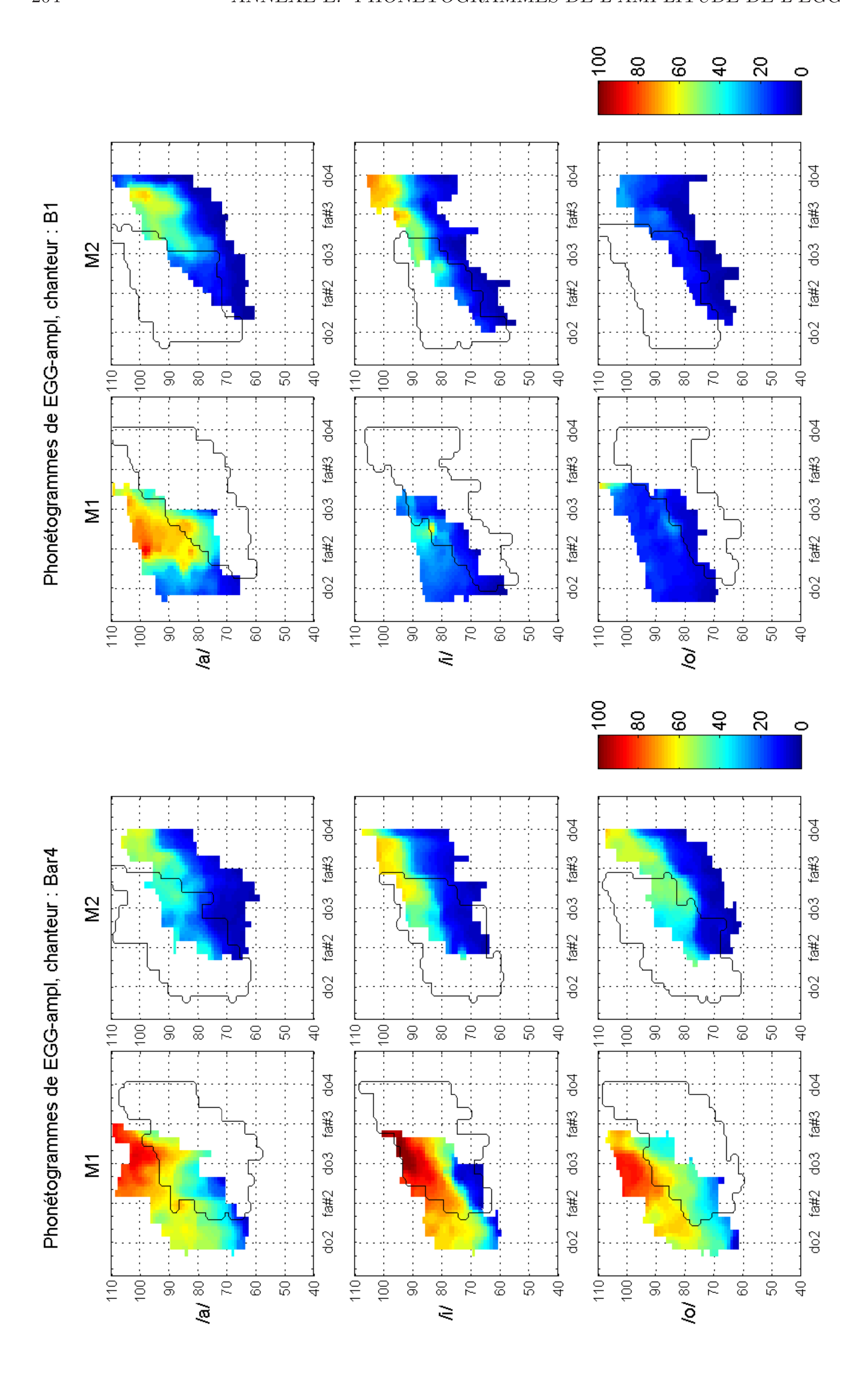


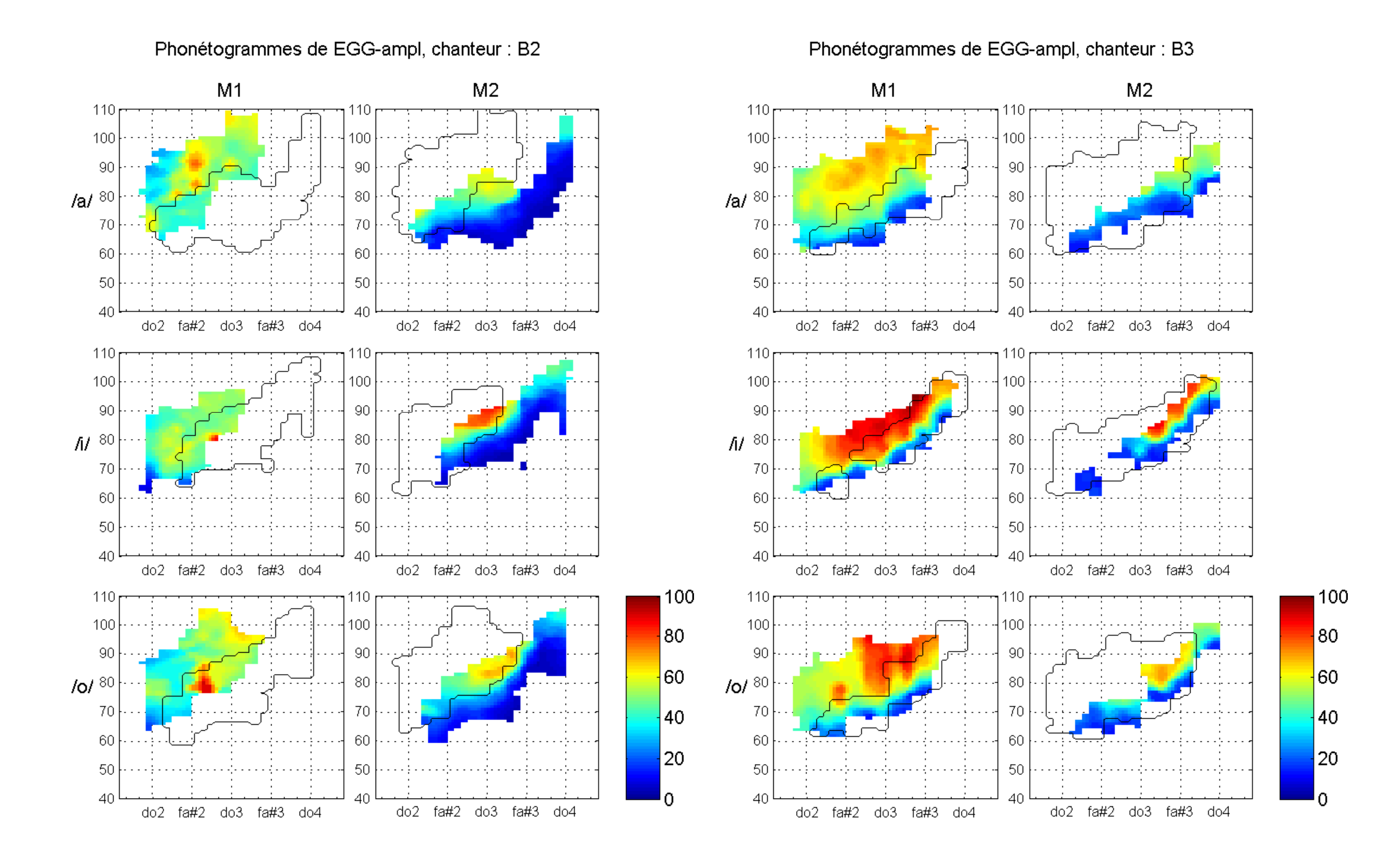
Phonétogrammes de EGG-ampl, chanteur : CT2
M1
M2
/a/
/i/
/o/
110
100
90
80
70
60
50
40
do2
fa#2
do3
fa#3
do4
100
80
60
40
20
0
Phonétogrammes de EGG-ampl, chanteur : T1


Phonétogrammes de EGG-ampl, chanteur : T2
Phonétogrammes de EGG-ampl, chanteur : T3
M1
M2
/a/
/i/
/o/
110
100
90
80
70
60
50
40
do2
fa#2
do3
fa#3
do4
100
80
60
40
20
0


Phonétogrammes de EGG-ampl, chanteur : T4
Phonétogrammes de EGG-ampl, chanteur : Bar1
M1
M2
/a/
/i/
/o/
110 100 90 80 70 60 50 40
do2 fa#2 do3 fa#3 do4
100 80 60 40 20 0


Phonétogrammes de EGG-ampl, chanteur : Bar2
M1
M2
/a/
/i/
/o/
110
100
90
80
70
60
50
40
do2
fa#2
do3
fa#3
do4
100
80
60
40
20
0
Phonétogrammes de EGG-ampl, chanteur : Bar3
M1
M2
/a/
/i/
/o/

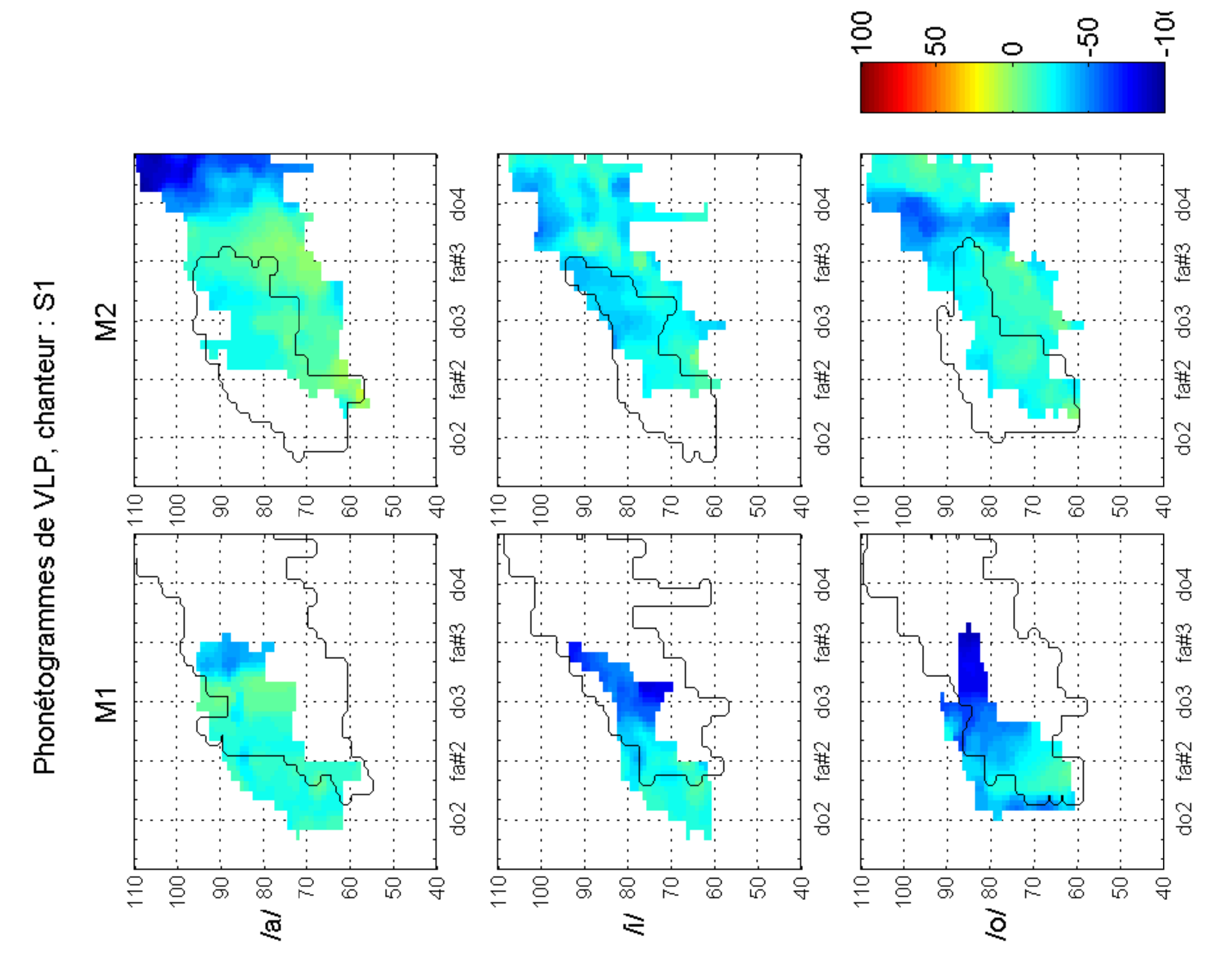

Phonétogrammes de EGG-ampl, chanteur : Bar4
Phonétogrammes de EGG-ampl, chanteur : B1
M1
M2
/a/
/i/
/o/
do2
fa#2
do3
fa#3
do4
110
100
90
80
70
60
50
40
100
80
60
40
20
0

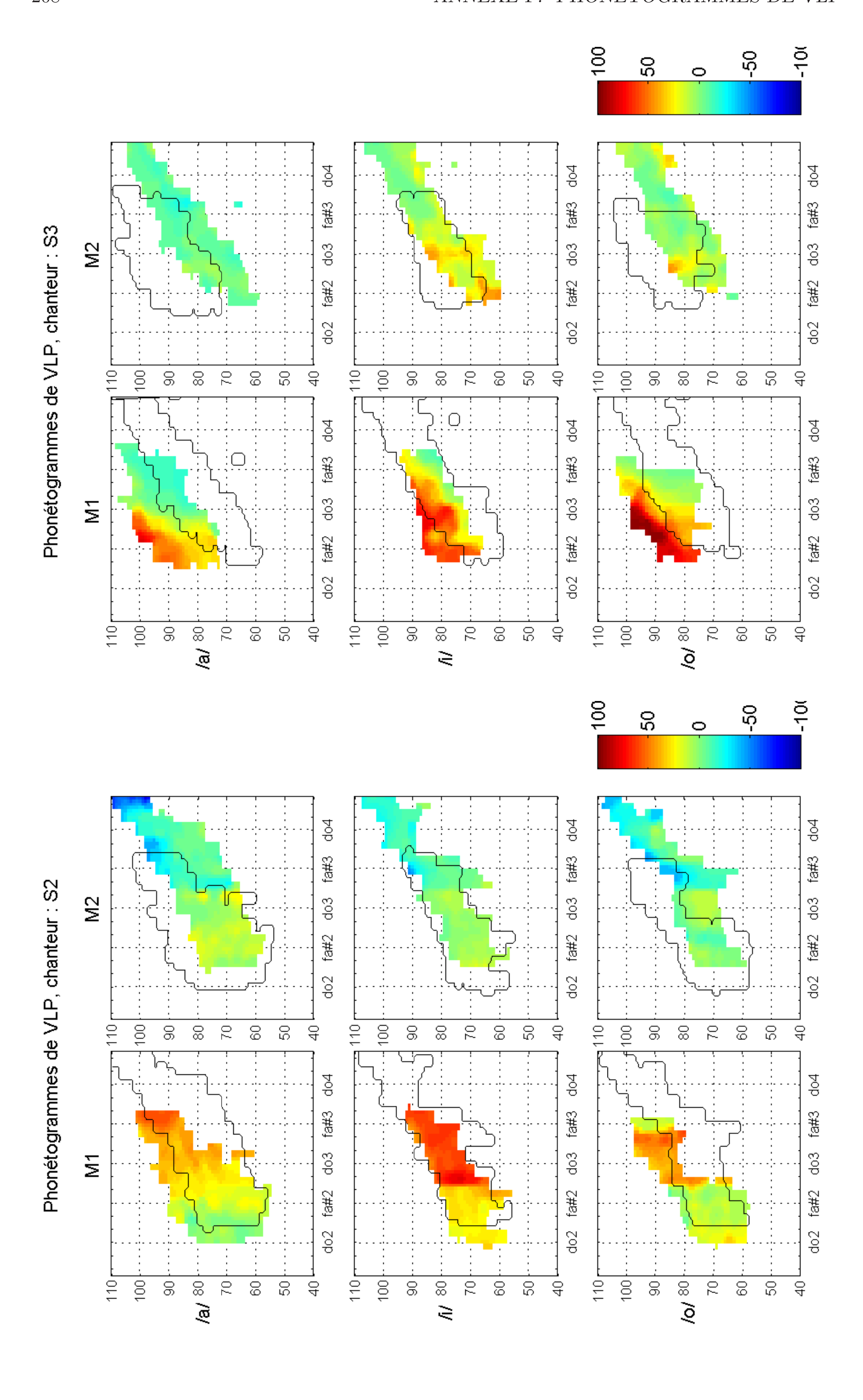

Phonétogrammes de EGG-ampl, chanteur : B2
Phonétogrammes de EGG-ampl, chanteur : B3
M1
M2
/a/
/i/
/o/
do2 fa#2 do3 fa#3 do4
40 50 60 70 80 90 100 110
0 20 40 60 80 100

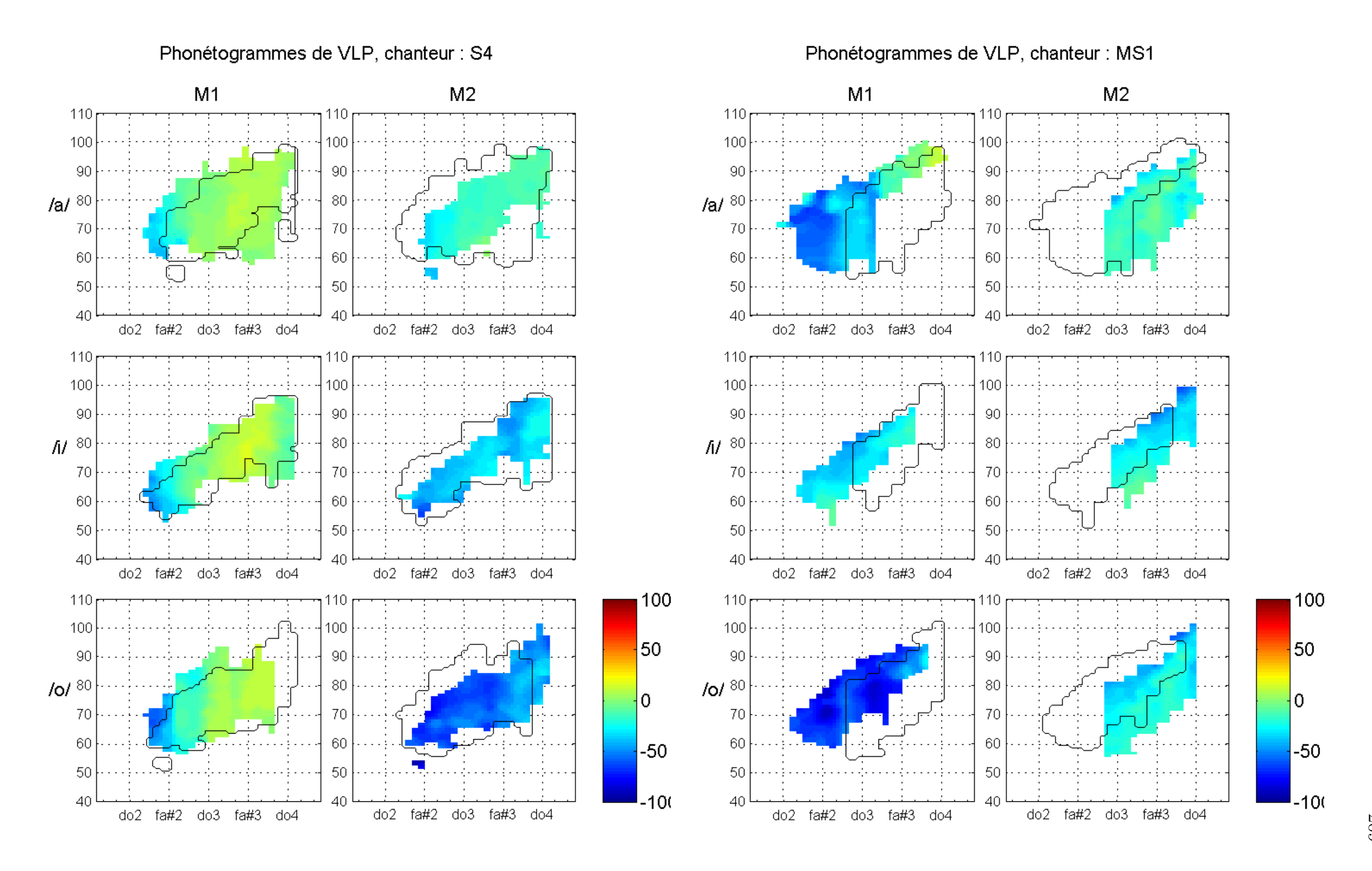
# Annexe F

# Phonétogrammes de VLP

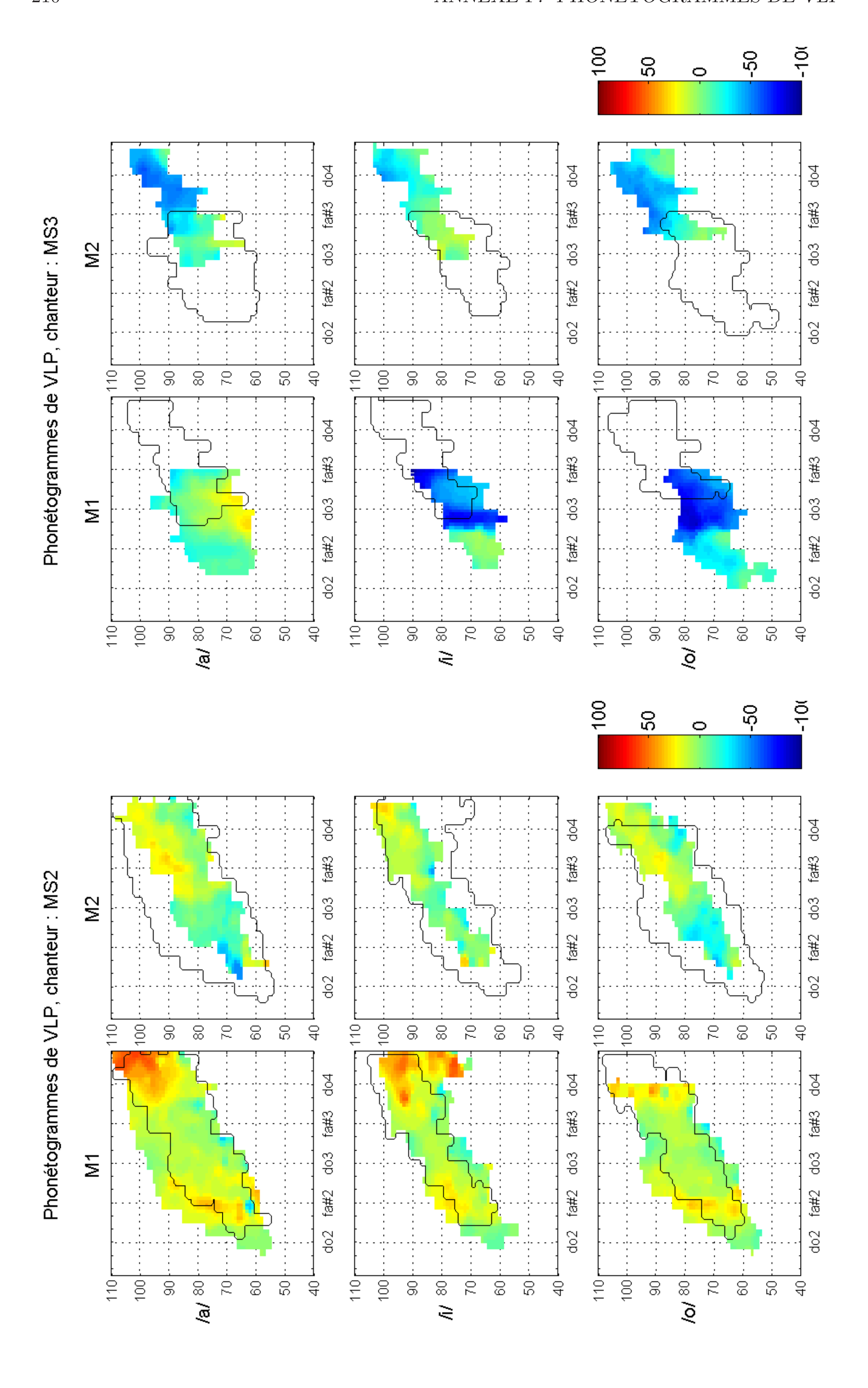
Dans l'ensemble de cette annexe, nous présentons les phonétogrammes de position verticale du larynx (VLP), par mécanisme laryngé, par voyelle, et pour chaque chanteur. Le VLP est normalisé, 0 % correspondant à la position de repos et ± 100 % au maximum (ou minimum selon le signe) de déviation de la position verticale du larynx par rapport à létat de repos.



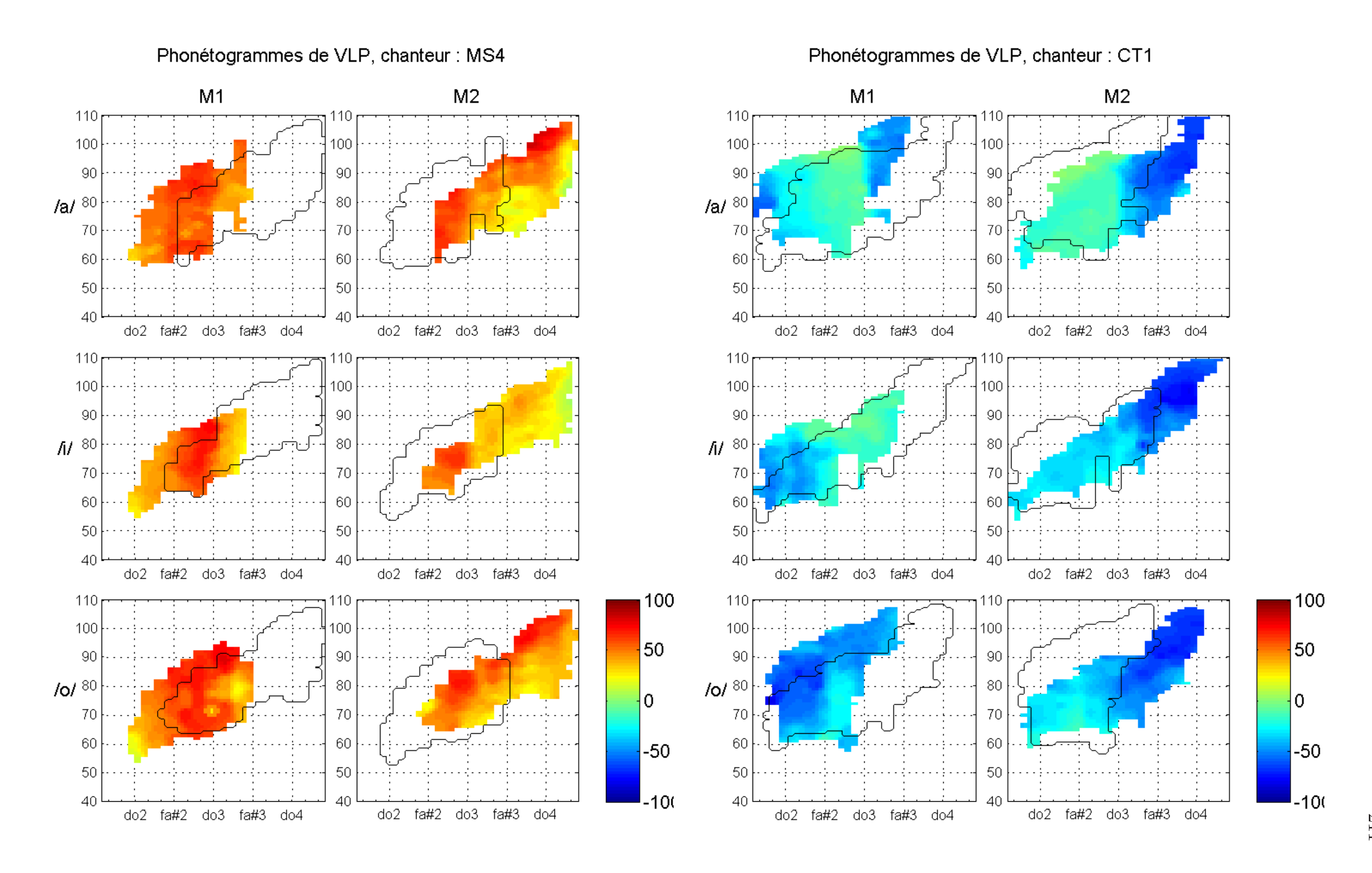

Phonétogrammes de VLP, chanteur : S2
Phonétogrammes de VLP, chanteur : S3
M1
M2
/a/
/i/
/o/
110
100
90
80
70
60
50
40
do2
fa#2
do3
fa#3
do4
100
50
0
-50
-10(

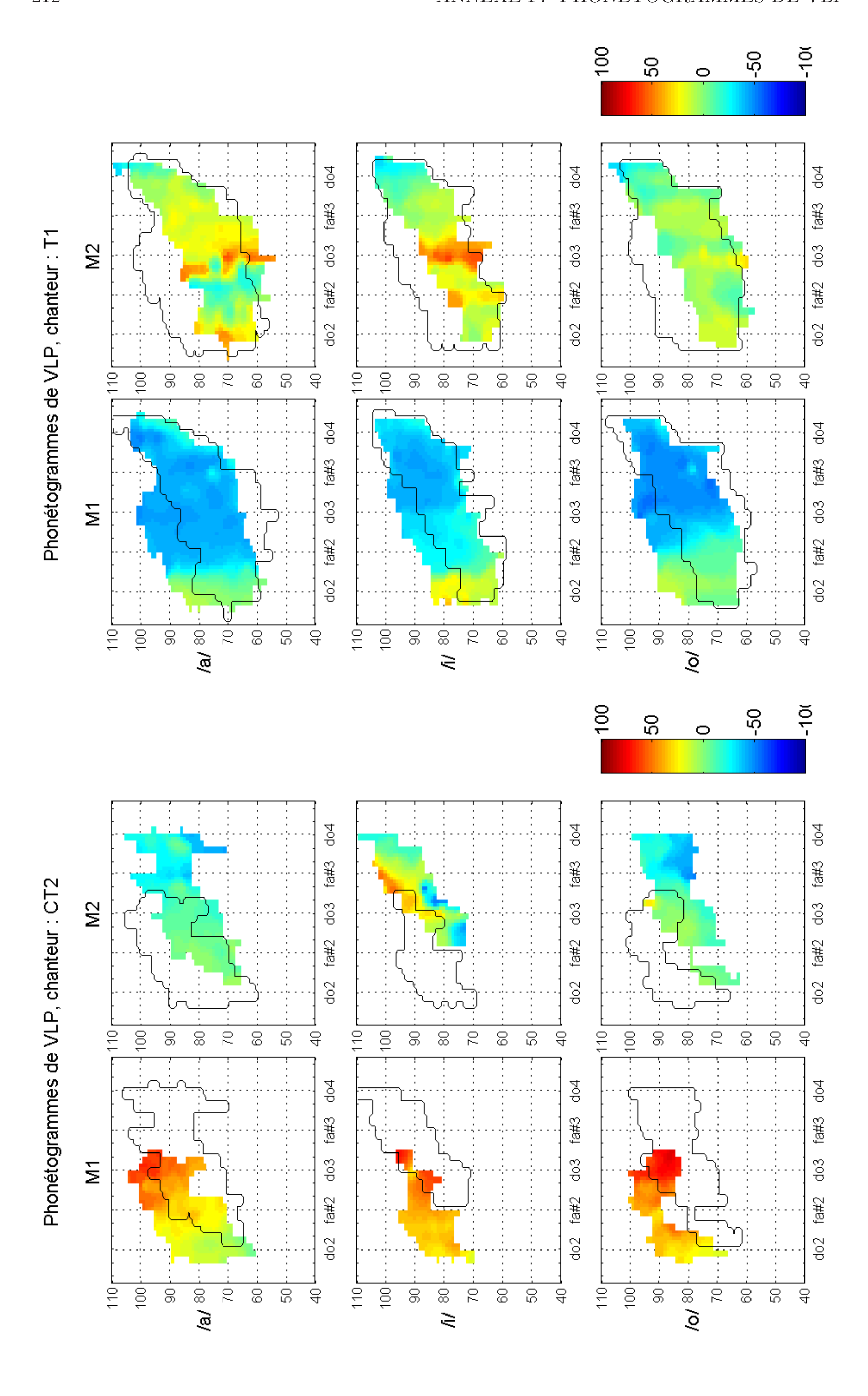


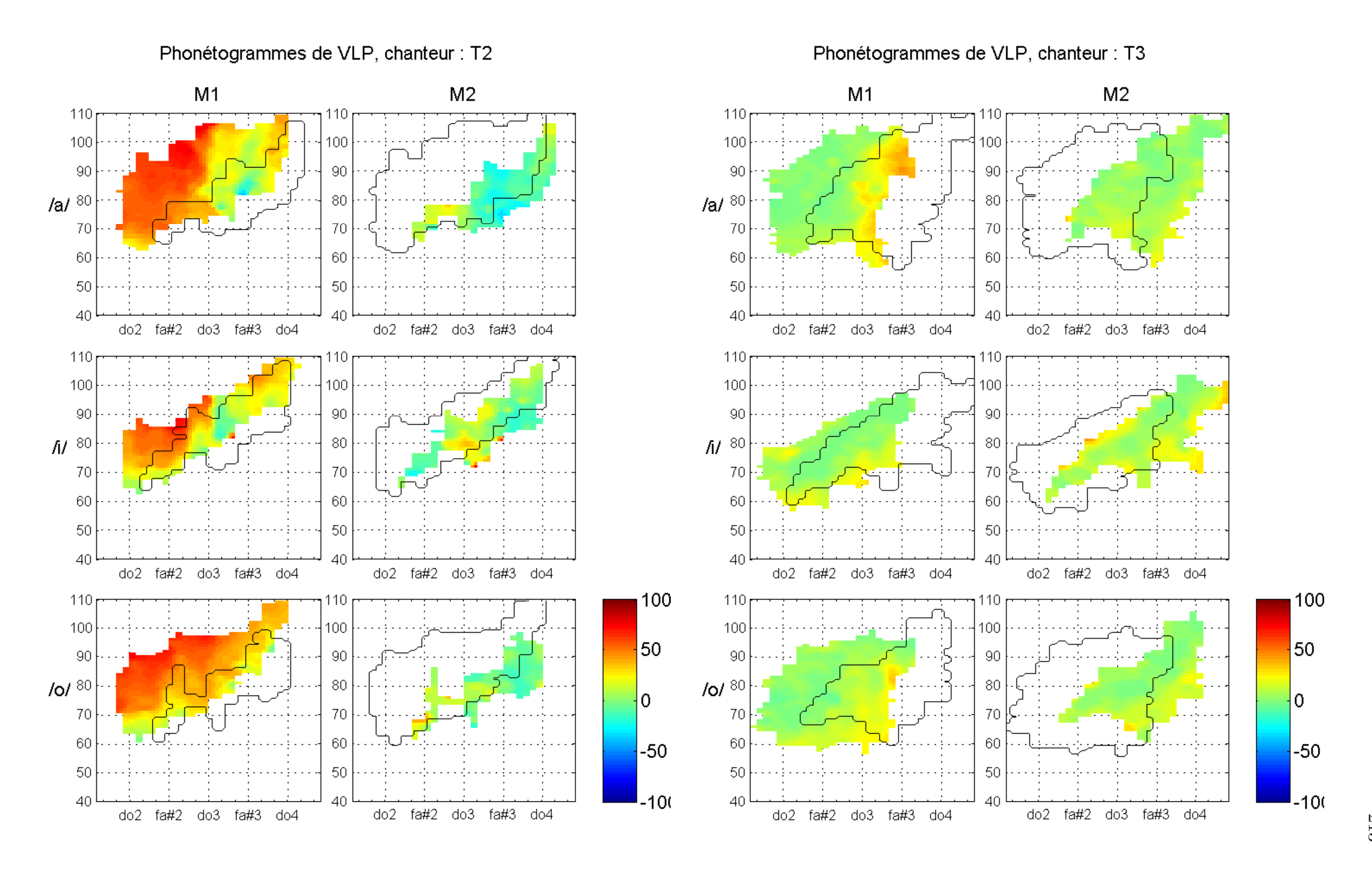
Phonétogrammes de VLP, chanteur : S4
M1
M2
/a/
/i/
/o/
110
100
90
80
70
60
50
40
do2
fa#2
do3
fa#3
do4
100
50
0
-50
-100
Phonétogrammes de VLP, chanteur : MS1
M1
M2
/a/
/i/
/o/



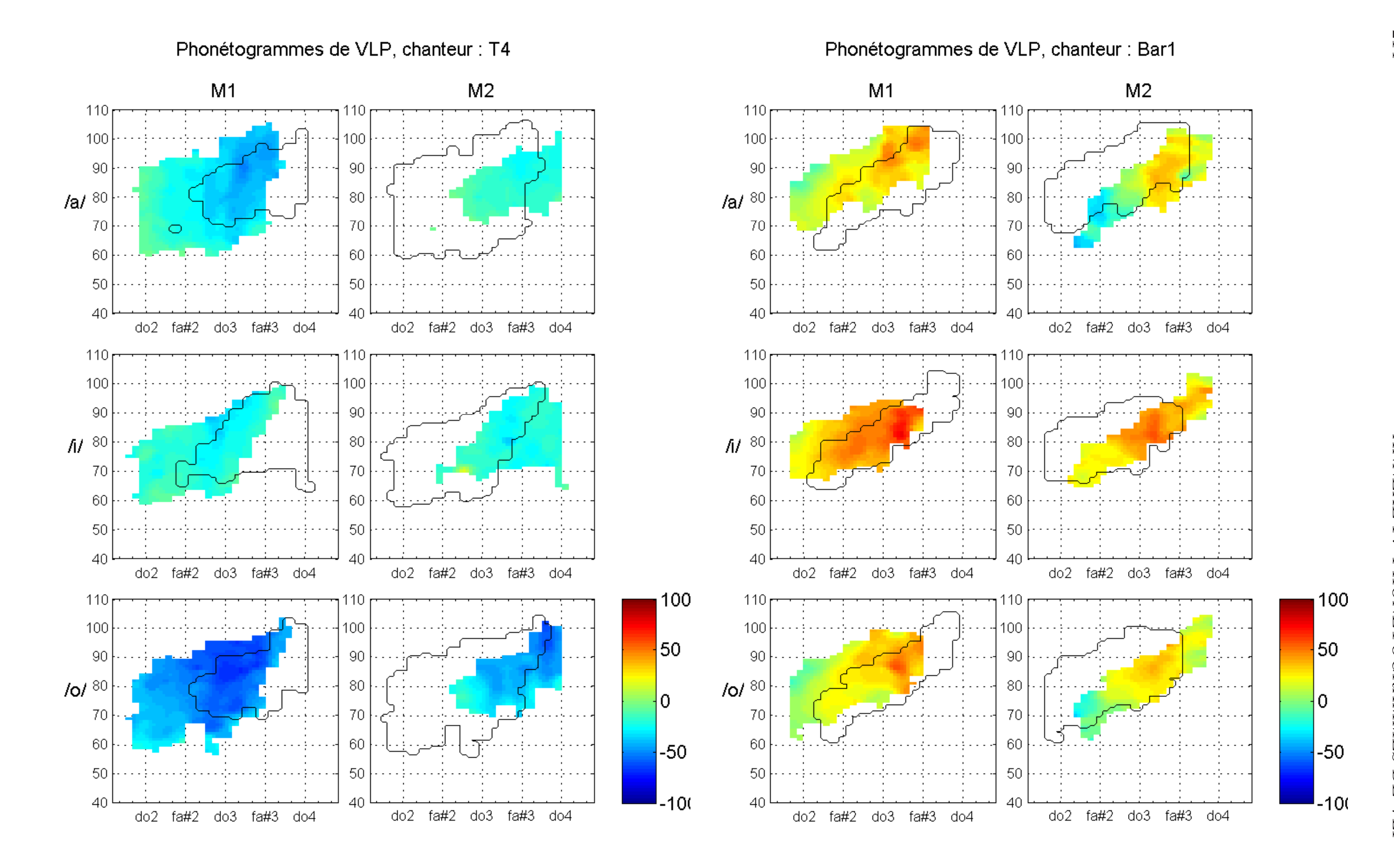
Phonétogrammes de VLP, chanteur : MS2
M1
M2
/a/
/i/
/o/
do2
fa#2
do3
fa#3
do4
110
100
90
80
70
60
50
40
100
50
0
-50
Phonétogrammes de VLP, chanteur : MS3
M1
M2
/a/
/i/
/o/


Phonétogrammes de VLP, chanteur : MS4
M1
M2
/a/
/i/
/o/
110
100
90
80
70
60
50
40
do2
fa#2
do3
fa#3
do4
100
50
0
-50
Phonétogrammes de VLP, chanteur : CT1
M1
M2
/a/
/i/
/o/

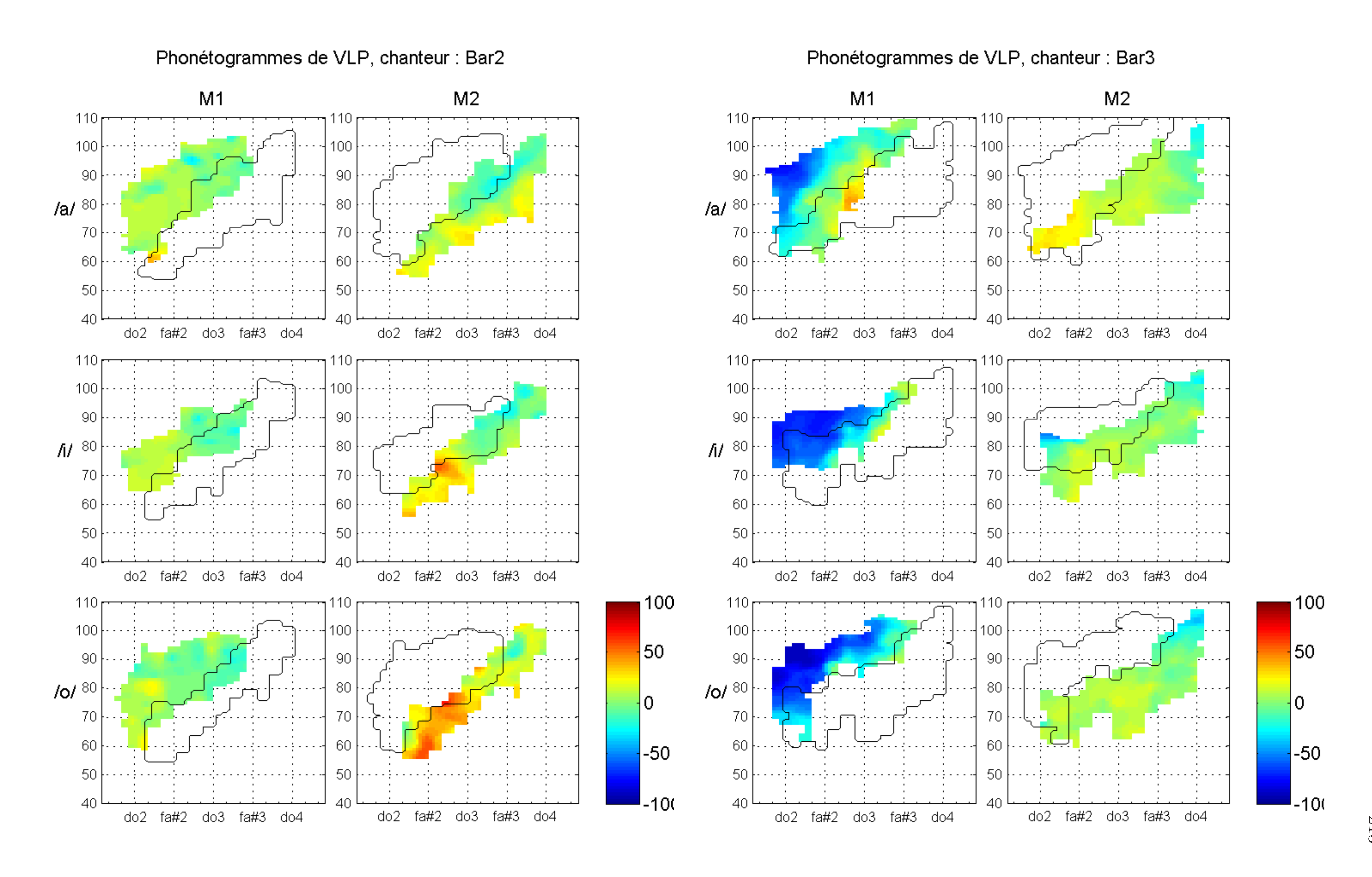

Phonétogrammes de VLP, chanteur : CT2
M1
M2
/a/
/i/
/o/
110
100
90
80
70
60
50
40
do2
fa#2
do3
fa#3
do4
100
50
0
-50
-100
Phonétogrammes de VLP, chanteur : T1

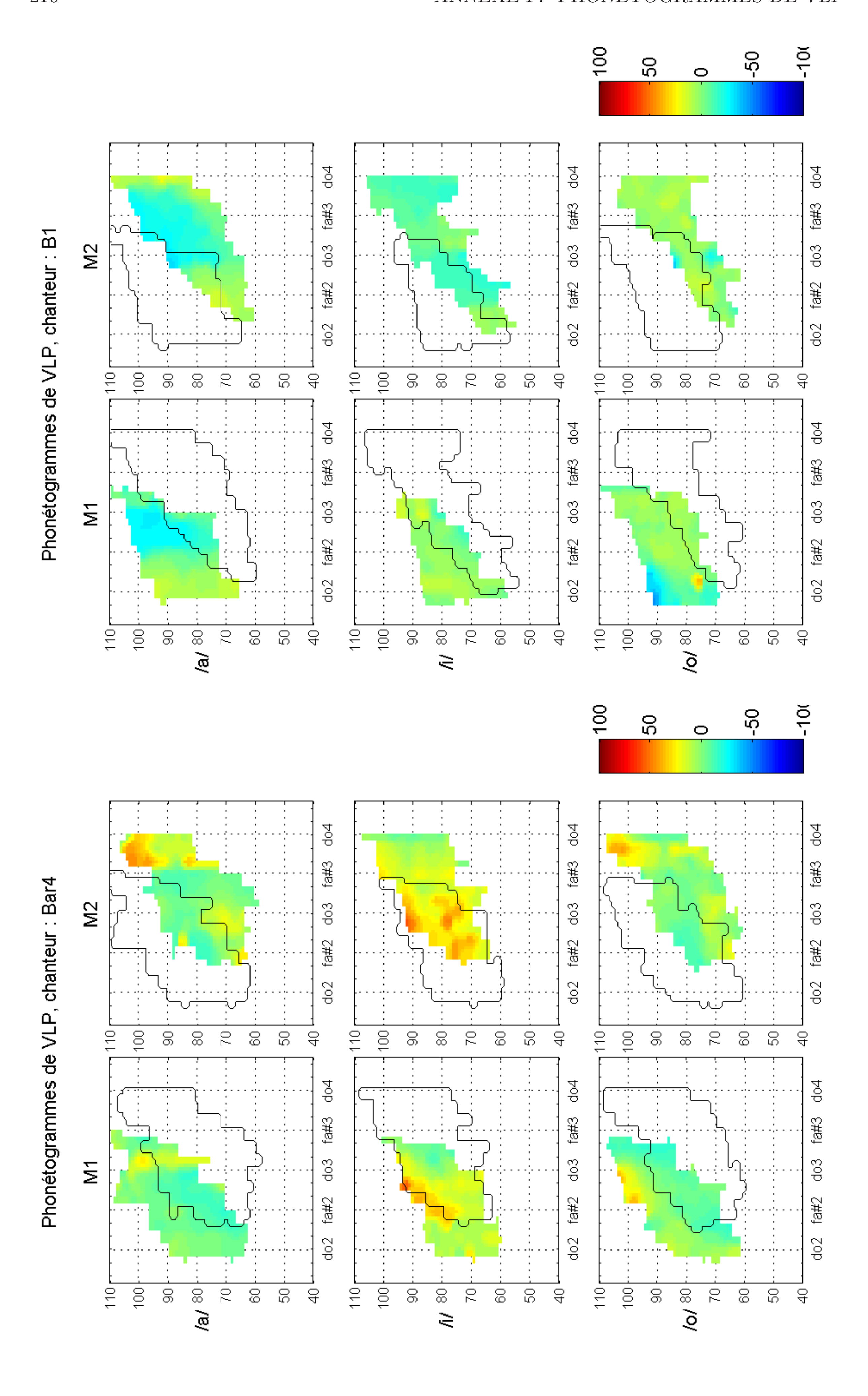


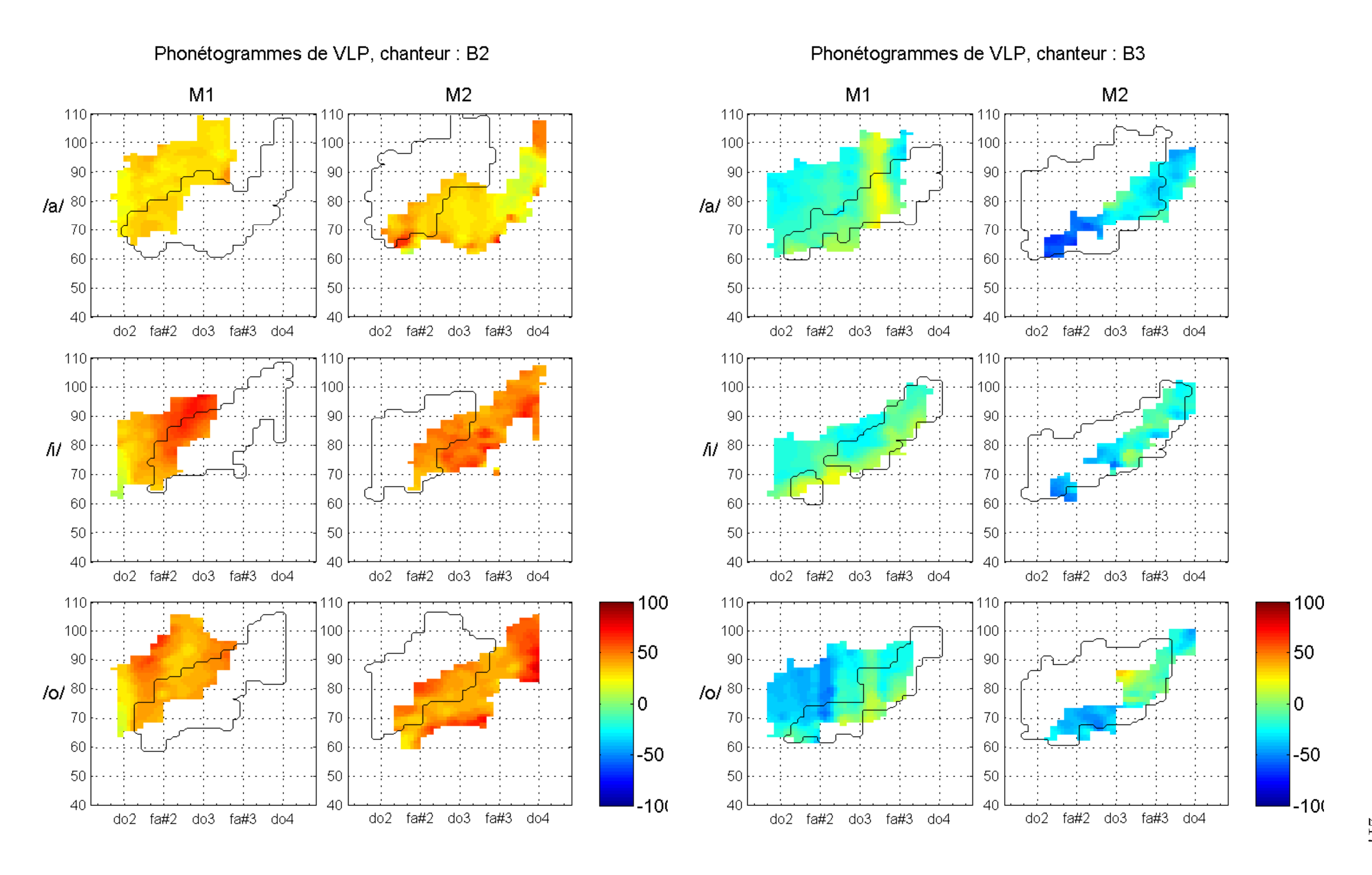
Phonétogrammes de VLP, chanteur : T2
Phonétogrammes de VLP, chanteur : T3
M1
M2
/a/
/i/
/o/
110
100
90
80
70
60
50
40
do2
fa#2
do3
fa#3
do4
100
50
0
-50
-10(



Phonétogrammes de VLP, chanteur : T4
Phonétogrammes de VLP, chanteur : Bar1
M1
M2
/a/
/i/
/o/
do2
fa#2
do3
fa#3
do4
110
100
90
80
70
60
50
40
100
50
0
-50
-10(


Phonétogrammes de VLP, chanteur : Bar2
Phonétogrammes de VLP, chanteur : Bar3
M1
M2
/a/
/i/
/o/
110
100
90
80
70
60
50
40
do2
fa#2
do3
fa#3
do4
100
50
0
-50


Phonétogrammes de VLP, chanteur : Bar4
M1
M2
/a/
/i/
/o/
110 100 90 80 70 60 50 40
do2 fa#2 do3 fa#3 do4
100 50 0 -50 -100
Phonétogrammes de VLP, chanteur : B1
M1
M2
/a/
/i/
/o/
110 100 90 80 70 60 50 40
do2 fa#2 do3 fa#3 do4
100 50 0 -50 -100


Phonétogrammes de VLP, chanteur : B2
Phonétogrammes de VLP, chanteur : B3
M1
M2
/a/
/i/
/o/
110 100 90 80 70 60 50 40
do2 fa#2 do3 fa#3 do4
100 50 0 -50 -10(

# Bibliographie

Ahmad, M. , Dargaud, J. , Morin, A. et Cotton, F. (2009), Dynamic MRI of larynx and vocal fold vibrations in normal phonation : *J. Voice*, 23(2):235–239.

Akerlund, L. et Gramming, P. (1994), Average loudness level, mean fundamental frequency, and subglottal pressure: Comparison between female singers and nonsingers : *J. Voice*, 8 (3):263–270.

Akerlund, L. , Gramming, P. et Sundberg, J. (1992), Phonetogram and averages of sound pressure levels and fundamental frequencies of speech: comparison between female singers and nonsingers : *J. Voice*, 6(1):55–63.

Albert, S. (2008), Transitions de 2 mécanismes laryngés: Etude des sauts de fréquence en fonction de la note et de l'amplitude d'émission, ainsi que de la voyelle. : Mémoire de D.E.A., Université Paris 6.

Alipour, F. , Berry, D. A. et Titze, I. R. (2000), A finite-element model of vocal-fold vibration : *J. Acous. Soc. Am.*, 108(6):3003–3012.

Amir, O. , Amir, N. et Michaeli, O. (2005), Evaluating the influence of warmup on singing voice quality using acoustic measures : *J. Voice*, 19(2):252–260.

Appelman, D. R. (1967), *The Science of Vocal Pedagogy* : Indiana University Press.

Awan, S. N. (1991), Phonetographic profiles and F0-SPL characteristics of untrained versus trained vocal groups : *J. Voice*, 5(1):41–50.

Bartholomew, W. T. (1934), A physical definition of "good voice-quality" in the male voice : *J. Acous. Soc. Am.*, 6:25–33.

Berry, D. A. , Herzel, H. , Titze, I. R. et Story, B. H. (1996), Bifurcations in excised larynx experiments : *J. Voice*, 10(2):129–138.

Bless, D. M. , Baken, R. J. , Hacki, T. , Fritzell, B. , Laver, J. , Schutte, H. K. , Hirano, M. , Loebell, E. , Titze, I. , Faure, M.-A. , Muller, A. , Wendler, J. , Fex, S. , Kotby, M. N. , Brewer, D. , Sonninen, A. et Hurme, P. (1992), International association of logopedics and phoniatrics (IALP) voice committee discussion of assessment topics : *J. Voice*, 6(2):194–210.

Bloothooft, G. et Pabon, J. P. H. (1999), Vocal registers revisited : *In Eurospeech'99, Budapest.*

Bloothooft, G. et Plomp, R. (1984), Spectral analysis of sung vowels. I. Variation due to differences between vowels, singers, and modes of singing : *J. Acous. Soc. Am.*, 75(4):1259–1264.

Bloothooft, G. et Plomp, R. (1985), Spectral analysis of sung vowels. II. The effect of fundamental frequency on vowel spectra : *J. Acous. Soc. Am.*, 77(4):1580–1588.

Bloothooft, G. et Plomp, R. (1986)a, The sound level of the singer's formant in professional singing : *J. Acous. Soc. Am.*, 79(6):2028–2033.

Bloothooft, G. et Plomp, R. (1986)b, Spectral analysis of sung vowels. III. Characteristics of singers and modes of singing : *J. Acous. Soc. Am.*, 79(3):852–864.

Bucella, F. , Hassid, S. , Beeckmans, R. , Soquet, A. et Demolin, D. (2000), Pression sous-glottique et débit d'air buccal des voyelles en français : *In XXIIIèmes Journées d'Etude sur la Parole.*

Calliope (1989), *La parole et son traitement automatique* : Masson. Paris, Milan, Barcelone, Mexico.

Calvet, J. (1953), *La Voix. Cours international de phonologie et de phoniatrie*, chap. Etudes phonométriques, p. 67–77 : Paris: Maloine.

Calvet, J. et Malhiac, G. (1952), Courbes vocales et mue de la voix : *J. Fr. Oto-Rhino-Laryngol.*, 1:115–124.

Castellengo, M. , Chuberre, B. et Henrich, N. (2004), Is *voix mixte*, the vocal technique used to smoothe the transition across the two main laryngeal mechanisms, an independent mechanism? : *In International Symposium on Musical Acoustics*.

Castellengo, M. , During, J. et Lamesch, S. (2007), The iranian tahrir: acoustical analysis of an ornamental vocal technique : *In 3rd Conference on Interdisciplinary Musicology, Tallinn.*

Castellengo, M. , During, J. et Lamesch, S. (2009), Acoustical analysis of an ornemental vocal technique: the iranian "tahrir" : *In 4th International Physiology and Acoustics of Singing Conference, San Antonio*.

Castellengo, M. (1991), *Cahiers de musiques traditionelles*, chap. Continuité, rupture, ornementation, ou les bons usages de la transition entre deux modes d'émission vocale, p. 155–165 : Ateliers d'ethnomusicologie.

Castellengo, M. (2002), *Le livre des techniques du son, 3è édition*, chap. Les sources acoustiques, p. 45–80 : Dunod.

Castellengo, M. (2005), Manuel Garcia Jr: A clear-sighted observer of human voice production : *Log. Phon. Vocol.*, 30:163–170.

Castellengo, M. , Roubeau, B. et Valette, C. (1983), Study of the acoustical phenomena characteristic of the transition between chest voice and falsetto : *In Procedings of the Stockholm Music Conference, July 28 - August 1*, p. 113–124. Royal Swedish Academy of Music.

Childers, D. G. et Wong, C. F. (1994), Measuring and modeling vocal source-tract interaction : *IEEE*, 41(7):663–671.

Childers, D. , Hicks, D. , Moore, G. , Eskenazi, L. et Alawani, A. (1990), Electroglottography and vocal fold physiology : *J. Speech Hear. Res.*, 33:245–254.

Childers, D. et Lee, C. (1991), Vocal quality factors: Analysis, synthesis, and perception : *J. Acous. Soc. Am.*, 90(5):2394–2410.

Childers, D. , Smith, A. et Moore, G. (1984), Relationships between electroglottograph, speech and vocal cords contact : *Folia Phoniat.*, 36:105–118.

Chuberre, B. (2000) : Les registres et passages dans la voix chantée. Mémoire de phoniatrie. Université de Nantes.

Cleveland, T. et Sundberg, J. (1983), Acoustic analysis of three male voices of different quality. *In* Askenfelt, A. , Felicetti, S. , Jansson, E. et Sundberg, J. , éds : *Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference*, vol. 46, p. 143–155.

Cleveland, T. et Sundberg, J. (1993), Acoustic analysis of three male voices of different quality : *J. Res. Singing*, 17(1):1–15.

Coffin, B. (1976), *Coffin's Sounds of singing. Principles and applications of vocal techniques with chromatic Vowel chart* : The Scarecrow Press, Inc. Lanham, Maryland, and London. Second Edition.

Coleman, R. F. (1993), Sources of variation in phonetograms : *J. Voice*, 7(1):1–14.

Coleman, R. F. et Mott, J. B. (1978), Fundamental frequency and sound pressure level profiles of young female singers : *Folia Phoniat.*, 30:94–102.

Collyer, S. , Davis, P. J. , Thorpe, C. W. et Callaghan, J. (2007), Sound pressure level and spectral balance linearity and symmetry in the *messa di voce* of female classical singers : *J. Acous. Soc. Am.*, 121(3):1728–1736.

Collyer, S. , Davis, P. J. , Thorpe, C. W. et Callaghan, J. (2009), Fundamental frequency influences the relationship between sound pressure level and spectral balance in female classically trained singers : *J. Acous. Soc. Am.*, 126(1):396–406.

Colton, R. H. (1973), Vocal intensity in the modal and falsetto registers : *Folia Phoniat.*, 25:62–70.

Colton, R. H. (1970), Vocal intensity in the modal and falsetto registers : *J. Acous. Soc. Am.*, 47:105.

Colton, R. H. et Hollien, H. (1972), Phonational range in the modal and falsetto registers : *J. Speech Hear. Res.*, 15:708–713.

Damsté, P. (1970), The phonetogram : *Practica-Oto-Rhino-Laryngologica*, 32:185–187.

Dang, J. et Honda, K. (1997), Acoustic characteristics of the piriform fossa in models and humans : *J. Acous. Soc. Am.*, 101(1):456–465.

Dejonckere, P. (1977), Le phonétogramme, son intérêt clinique : *Cah. Oto-Rhino-Laryngol*, 12:865–872.

Delle Sedie, E. (1874), *L'art lyrique. Traité complet de chant et de déclamation lyrique* : Paris.

Dmitriev, L. et Kiselev, A. (1979), Relationship between the formant structure of different types of singing voices and the dimensions of supraglottic cavities : *Folia Phoniat.*, 31(4):238–241.

Doval, B. , d'Alessandro, C. et Henrich, N. (2006), The spectrum of glottal flow models : *Acta Acoustica*, 92(6):1026–1046.

During, J. (1984), *La musique iranienne. Tradition et évolution* : Recherches sur les civilisations, Paris.

During, J. (2008) : Entretien avec Mozafar Shafi'i, chanteur iranien, à propos de l'utilisation des voyelles dans le tahrir.

Elliot, N. , Sundberg, J. et Gramming, P. (1997), Physiological aspects of a vocal exercise : *J. Voice*, 11(2):171–177.

Epps, J. , Smith, J. R. et Wolfe, J. (1997)a, A novel instrument to measure acoustic resonances of the vocal tract during phonation : *Meas. Sci. Technol.*, 8:1112–1121.

Epps, J. , Dowd, A. , Smith, J. et Wolfe, J. (1997)b, Real time measurements of the vocal tract resonances during speech : *In ESCA. Eurospeech97. Rhodes, Greece*, p. 721–724.

Expert, R. (2003) : Les voix d'alto. Mémoire de recherche de la classe d'Acoustique Musicale du CNSMDP.

Expert, R. (2007) : Voix de poitrine et voix de tête, quelle pédagogie aujourd'hui? Mémoire de la classe de pédagogie du CNSMDP.

Expert, R. (2008) : Entretien personel.

Fant, G. (1995), The LF-model revisited. transformations and frequency domain analysis : *STL-QPSR*, 36(2-3):119–156.

Fant, G. , Fintoft, K. , Liljencrants, J. , Lindblom, B. et Mártony, J. (1963), Formant-amplitude measurements : *J. Acous. Soc. Am.*, 35(11):1753–1761.

Fant, G. , Liljencrants, J. et Lin, Q. (1985), A four-parameter model of glottal flow : *STL-QPSR*, 26(4):1–13.

Fant, G. et Lin, Q. (1987), Glottal source - vocal tract acoustic interaction : *STL-QPSR*, 28 (1):13–27.

Fant, G. (1966), A note on vocal tract size factors and non-uniform F-pattern scalings : *STL-QPSR*, 7(4):22–30.

Fant, G. (1970), *Acoustic Theory of Speech Production* : Mouton. The Hague. Paris, 2ème édn.

Ferguson, S. , Kenny, D. T. et Cabrera, D. (2010), Effects of training on time-varying spectral energy and sound pressure level in nine male classical singers : *J. Voice*, 24(1):39–46.

Flanagan, J. L. (1965), *Speech analysis, synthesis and perception* : Sprinter-Verlag. Berlin. Heidelberg. New York.

Flanagan, J. (1968), Source-system interaction in the vocal tract : *Annals of the New York Academy of Sciences*, 117(1):9–17.

Fürniss, S. (1988), Considérations phonétiques sur le jodel des pygmées aka : Mémoire de D.E.A., Université Paris 3.

Fürniss, S. (1991), *Cahiers de musiques traditionelles*, chap. La technique du jodel chez les Pygmées Aka (Centrafrique): Etude phonétique et acoustique, p. 167–188 : Ateliers d'ethno-musicologie.

Frøkjaer-Jensen, B. et Prytz, S. (1976), Registration of voice quality : *Brüel & Kjaer Technical Review*, 3:3–17.

Garcia, M. (1856), *Traité sommaire de l'art du chant* : Richard, 4è édition, Paris.

Garcia, M. (1863), *Nouveau traité de l'art du chant, 5è édition* : Paris, Heugel.

Gramming, P. (1991), Vocal loudness and frequency capabilities of the voice : *J. Voice*, 5 (2):144–157.

Gramming, P. et Sundberg, J. (1988), Spectrum factors relevant to phonetogram measurement : *J. Acous. Soc. Am.*, 83(6):2352–2360.

Gramming, P. , Sundberg, J. et Akerlund, L. (1991), Variability of phonetograms : *Folia Phoniat.*, 43:79–92.

Gramming, P. , Sundberg, J. , Ternström, S. , Leanderson, R. et Perkins, W. H. (1988), Relationship between changes in voice pitch and loudness : *J. Voice*, 2(2):118–126.

Hacki, T. , Frittrang, B. , Zywietz, C. et Zupan, C. (1990), Verfahren zur statistischen Ermittlung von Stimmfeldgrenzen - Das Durschnittsstimmfeld : *Sprache - Stimme - Gehör*, 14:110–112.

Hacki, T. (1996), Comparative speaking, shouting and singing voice range profile measurement: physiological and pathological aspects : *Log. Phon. Vocol.*, 21:123–129.

Hanson, H. M. (1997), Glottal characteristics of female speakers: Acoustic correlates : *J. Acous. Soc. Am.*, 101(1):466–480.

Hanson, H. M. et Chuang, E. S. (1999), Glottal characteristics of male speakers: Acoustic correlates and comparison with female data : *J. Acous. Soc. Am.*, 106(2):1064–1077.

Henrich, N. (2001), *Etude de la source gottique en voix parlée et chantée. Modélisation et estimation, mesures acoustiques et électroglottographiques, perception* : Thèse de doctorat, Université Paris 6.

Henrich, N. (2006), Mirroring the voice from Garcia to the present day: Some insights into singing voice registers : *Log. Phon. Vocol.*, 31:3–14.

Henrich, N. , d'Alessandro, C. , Doval, B. et Castellengo, M. (2005), Glottal open quotient in singing: measurements and correlation with laryngeal mechanisms, vocal intensity, and fundamental frequency : *J. Acous. Soc. Am.*, 117(3):1417–1430.

Henrich, N. , Kiek, M. , Smith, J. et Wolfe, J. (2007), Resonance strategies used in bulgarian women's singing style: A pilot study : *Log. Phon. Vocol.*, 32(4):171–177.

Henrich, N. , Smith, J. et Wolfe, J. (2008), Resonance strategies and glottal behaviour in the two main laryngeal mechanisms for professional operatic singers : *In Acoustics'08, Paris. In J. Acous. Soc. Am.*, 123(5):3243.

Herzel, H. (1995), *Vocal Fold Physiology*, chap. Possible Mechanisms of Vocal Instabilities, p. 63–75 : Singular Publishing Group, Inc, San Diego, London.

Hirano, M. (1982), *Vox Humana*, chap. The role of the layer structure of the vocal folds in register control, p. 50–62 : Institute of the Finnish Language and Communication.

Hirano, M. , Ohala, J. et Vennard, W. (1969), The function of laryngeal muscles in regulating fundamental frequency and intensity of phonation : *J. Speech Hear. Res.*, 12(3):616–628.

Hunter, E. J. , Svec, J. G. et Titze, I. R. (2006), Comparison of the produced and perceived voice range profiles in untrained and trained classical singers : *J. Voice*, 20(4):513–526.

Hunter, E. J. et Titze, I. R. (2005), Overlap of haring and voicing ranges in singing : *J. Singing*, 61(4):387–392.

Husson, R. (1962), *Physiologie de la phonation* : Masson, Paris.

Ishizaka, K. et Flanagan, J. (1972), Synthesis of voiced sounds from a two-mass model of the vocal cords : *Bell. Syst. Tech. J.*, 21(6):2233–2268.

Joliveau, E. , Smith, J. et Wolfe, J. (2004)a, Tuning of vocal tract resonance by sopranos : *Nature*, 427:116.

Joliveau, E. , Smith, J. et Wolfe, J. (2004)b, Vocal tract resonances in singing: The soprano voice : *J. Acous. Soc. Am.*, 116(4):2434–2439.

Kitamura, T. , Takemoto, H. , Adachi, S. , Mokhtari, P. et Honda, K. (2006), Cyclicity of laryngeal cavity resonance due to vocal fold vibration : *J. Acous. Soc. Am.*, 120(4):2239–2249.

Klingholz, F. (1992), Computer aided evaluation of phonetograms : *Computer methods and programs in biomedicine*, 37:127–135.

Klingholz, F. et Martin, F. (1983), Die quantitative Auswertung der Stimmfeldmessung : *Sprache - Stimme - Gehör*, 7:106–110.

Kob, M. (2002), *Physical Modeling of the Singing Voice* : Berlin : Logos Verlag.

Komiyama, S. , Watanabe, H. et Ryu, S. (1984), Phonetographic relationship between pitch and intensity of the human voice : *Folia Phoniat.*, 36:1–7.

Konzelmann, U. , Moser, M. et Kittel, G. (1989), Messungen bei Chorsänger vor und nach Stimmbelastung unten besonderer Berücksichtigung des Sängerformanten : *Sprache - Stimme - Gehör*, 13:112–118.

Lacau St Guily, J. et Roubeau, B. (1994), Voies nerveuses et physiologie de la phonation : *EMC Oto-rhino-laryngologie*.

Lamarche, A. (2009), *Putting the Singing Voice on the Map. Towards Improving the Quantitative Evaluation of Voice Status in Professional Female Singers* : Thèse de doctorat, KTH School of Computer Science and Communication, Stockholm.

Lamarche, A. et Ternström, S. (2008), An exploration of skin acceleration level as a measure of phonatory function in singing : *J. Voice*, 22(1):10–22.

Lamesch, S. (2006), Caractérisation de la voix mixte en termes de mécanismes laryngés : Mémoire de D.E.A., Université Paris 6.

Lamesch, S. et Doval, B. (2007), What are the differences for singing sounds produced by different laryngeal mechanisms in the same pitch range? : *In 9th International Congress on Acoustics*.

Lamesch, S. , Doval, B. et Castellengo, M. (2008), Phonetograms of laryngeal source parameters for different vowels and laryngeal mechanisms : *In Acoustics'08, Paris. In J. Acous. Soc. Am.*, 123(5):3243.

Lamesch, S. , Expert, R. , Castellengo, M. , Henrich, N. et Chuberre, B. (2007), Investigating voix mixte: A scientific challenge towards a reniewed pedagogy : *In 3rd Congress on Interdisciplinary Musicology*.

Large, J. , Iwata, S. et von Leden, H. (1972), The male operatic head register versus falsetto : *Folia Phoniat.*, 24:19–29.

Laukkanen, A.-M. , Takalo, R. , Vilkman, E. , Nummenranta, J. et Lipponen, T. (1999), Simultaneous videofluorographic and dual-channel electroglottographic registration of the vertical laryngeal position in various phonatory tasks : *J. Voice*, 13(1):60–71.

Le Huche, F. et Allali, A. (1984), *La voix. Anatomie et physiologie des organes de la voix et de la parole* : Masson.

LeBorgne, W. D. et Weinrich, B. D. (2002), Phonetogram changes for trained singers over a nine-month period of vocal training : *J. Voice*, 16(1):37–43.

Legent, F. , Perlemutier, L. et Vanderbrouck, C. (1975), *Cahiers d'anatomie O.R.L* : Masson, deuxième édn.

Leothaud, G. (2004) : Théorie de la phonation. Cours de deuxième année de DEUG.

Löfqvist, A. , Carlborg, B. et Kitzing, P. (1982), Initial validation of an indirect measure of subglottal pressure during vowels : *J. Acous. Soc. Am.*, 72(2):633–635.

Lucero, J. C. (1993), Dynamics of the two-mass model of the vocal folds: Equilibria, bifurcations, and oscillation region : *J. Acous. Soc. Am.*, 94(6):3104–3111.

Lucero, J. C. (1996), Chest- and falsetto-like oscillations in a two-mass model of the vocal folds : *J. Acous. Soc. Am.*, 100(5):3355–3359.

Lucero, J. C. (2005), Oscillation hysteresis in a two-mass model of the vocal folds : *J. Sound Vibr.*, 282(3-5):1247–1254.

Makhoul, J. (1975), Linear prediction: A tutorial review : *Proc. IEEE*, 63(4):561– 580.

Mendes, A. P. , Rothman, H. B. , Sapienza, C. et W.S. Brown, J. (2003), Effects of vocal training on the acoustic parameters of the singing voice : *J. Voice*, 17(4):529–543.

Mengozzi, B. (1803), *Méthode de chant du conservatoire de musique* : Imprimerie du conservtaoire de musique, Paris.

Miller, D. G. et Schutte, H. K. (1993), Physical definition of the "flageolet" register : *J. Voice*, 7(3):206–212.

Miller, D. G. , Sulter, A. M. , Schutte, H. K. et Wolf, R. F. (1997), Comparison of vocal tract formants in singing and nonperiodic phonation : *J. Voice*, 11(1):1–11.

Miller, D. G. , Svec, J. G. et Schutte, H. K. (2002), Measurement of characteristic leap interval between chest and falsetto registers : *J. Voice*, 16(1):8–19.

Miller, D. G. (2000), *Registers in Singing. Empirical and Systematic Studies in the Theory of the Singing Voice* : Thèse de doctorat, Rijksuniversiteit Groningen.

Miller, L. C. (1999), *Music and Song in Persia: The Art of Avaz* : University of Utah Press.

Miller, R. (1990), *La structure du chant* : IPMC.

Mürbe, D. , Sundberg, J. , Iwarsson, J. , Pabst, F. et Hofmann, G. (1999), Longitudinal study of solo singer education effects on maximum SPL and level in the singers' formant range : *Log. Phon. Vocol.*, 24:178–186.

Mörner, M. , Fransson, F. et Fant, G. (1963), Voice register terminology and standard pitch : *STL-QPSR*, 4(4):17–23.

Nawka, T. , Anders, L. C. , Cebulla, M. et Zurakowski, D. (1997), The speaker's formant in male voices : *J. Voice*, 11(4):422–428.

Neuschäfer-Rube, C. , Wein, B. , Angerstein, W. et Klajman, S. (1996), Kernspintomographische Untersuchnung der Kehlkopfstellungen beim Singen von Vokalen : *Folia Phoniatr. logop.*, 48:201–209.

Nordenberg, M. et Sundberg, J. (2004), Effect on LTAS of vocal loudness variation : *Log. Phon. Vocol.*, 29(4):183–191.

Omori, K. , Kacker, A. , Carroll, L. M. , Riley, W. D. et Blaugrund, S. M. (1996), Singing power ratio: Quantitative evaluation of singing voice quality. : *J. Voice*, 10(3):228–235.

Ormezzano, Y. (2000), *Le guide de la voix* : Odile Jacob, Paris.

Pabon, J. P. H. (2004), Voice dynamics and spectral slope : *In Pan European Voice Conference, Stockolhm.* [Poster].

Pabon, J. P. H. et Plomp, R. (1988), Automatic phonetogram recording supplemented with acoustical voice-quality parameters : *J. Speech Hear. Res.*, 31:710–722.

Pabon, J. P. H. (1991), Objective acoustic voice-quality parameters in the computer phonetogram : *J. Voice*, 5(3):203–216.

Pabon, J. P. H. (1993), The phonetogram in singing voice analysis and synthesis : *In Proceedings on the Stockholm Music Acoustic Conference, 28th July - 1st August.*

Pabst, F. et Sundberg, J. (1993), Tracking multi-channel electroglottograph measurement of larynx height in singers : *Scand. J. Log. Phon.*, 18:143–152.

Pillot, C. (2004), *L'efficacité vocale dans le chant lyrique: Aspects physiologique, cognitif, acoustique et perceptif.* : Thèse de doctorat, Université Paris 3.

Pillot, C. et Quattrocchi, S. (1996), Mesures acoustiques, jugements perceptifs et corrélats physiologiques du singing-formant chez les chanteurs et les chanteuses lyriques : *Rev. Laryngol. Otol. Rhinol.*, 117(4):335–339.

Plant, R. L. et Younger, R. M. (2000), The interrelationship of subglottic air pressure, fundamental frequency, and vocal intensity during speech : *J. Voice*, 14(2):170–177.

Ragot, M. (1998) : Phonétogramme des mécanismes vibratoires laryngés et champ de liberté de la voix chantée chez l'enfant et chez l'adulte. Mémoire pour le certificat de capacité d'orthophoniste.

Randi, I. (2008) : La source vocale. Pression sous-glottique et dynamique glottique. Mémoire pour le certificat de Capacité d'Orthophonie.

Röbel, A. et Rodet, X. (2005), Efficient spectral envelope estimation and its application to pitch shifting and envelope preservation : *In 8th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx'05), Madrid*.

Rothenberg, M. (1992), A multichannel electroglottograph : *J. Voice*, 6(1):36–43.

Roubeau, B. , Castellengo, M. , Bodin, P. et Ragot, M. (2004), Phonétogramme par registre laryngé : *Folia Phoniatr. Logop.*, 56:321–333.

Roubeau, B. , Chevrie-Muller, C. et Arabia, C. (1987), Electroglottographic study of the changes of voice register : *Folia Phoniat.*, 39:280–289.

Roubeau, B. , Chevrie-Muller, C. et Arabia, C. (1989), Control of laryngeal vibration in register change : *In Vocal Fold Physiology Conference, Stockholm*, p. 279–286. Gauffin J, Hammaberg B, eds.

Roubeau, B. (1993), *Mécanismes vibratoires laryngés et contrôle neuromusculaire de la fréquence fondamentale* : Thèse de doctorat, Université Paris XI, Orsay.

Roubeau, B. , Henrich, N. et Castellengo, M. (2009), Laryngeal vibratory mechanisms: The notion of vocal register revisited : *J. Voice*, 23(4):425 – 438.

Sakakibara, K.-I. (2003), Production mechanism of voice quality in singing : *Journal of the Phonetic Society of Japan*, 7(3):27–39.

Schultz-Coulon, H. , Battmer, R. et Riechers, H. (1979)a, Der 3-kHz-Formant, ein Mass für die Tragfähigkeit der Stimme? I. Die untrainierte Stimme : *Folia Phoniat.*, 31:291–301.

Schultz-Coulon, H. , Battmer, R. et Riechers, H. (1979)b, Der 3-kHz-Formant, ein Mass für die Tragfähigkeit der Stimme? II. Die trainierte Stimme : *Folia Phoniat.*, 31:302–313.

Schultz-Coulon, H. N. et Asche, S. (1988), Das "Normstimmfeld" - ein Vorschlag : *Sprache - Stimme - Gehör*, 12:5–8.

Schutte, H. K. et Miller, R. (1984), Resonance balance in register categories of the singing voice: a spectral analysis study : *Folia Phoniat.*, 36(6):289–295.

Schutte, H. K. et Miller, R. (1985), Intraindividual parameters of the singer's formant : *Folia Phoniat.*, 37(1):31–35.

Schutte, H. K. et Seidner, W. (1983), Recommendation by the Union of European Phoniatricians (UEP): standardizing voice area measurement/phonetography : *Folia Phoniat.*, 35:286–288.

Schutte, H. K. (1980), *The efficiency of voice production* : Kemper.

Seidner, W. , Schutte, H. K. , Nawka, T. et Eichhorst, P. (1995), Zur praktischen Bedeutung der Messung hoher Formantpegel bei der phoniatrischen Stimmbeurteilung : *Laryngo-Rhino-Otol*, 74(4):254–258.

Seidner, W. , Schutte, H. , Wendler, J. et Rauhut, A. (1983), Dependence of the high singing formant on pitch and vowel in different voice types. *In* Askenfelt, A. , Felicetti, S. , Jansson, E. et Sundberg, J. , éds : *Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference*, vol. 46, p. 261–268. Royal Swedish Academy of Music, Stockholm.

Seidner, W. , Krüger, H. et Wernecke, K.-D. (1985), Numerische Auswertung spektraler Stimmfelder : *Sprache - Stimme - Gehör*, 9(1):10–13.

Shipp, T. , Ternström, S. et Cleveland, T. (1984), Effects of vocal frequency and effort on vertical laryngeal position : *J. Res. Singing*, 7(2):1–5.

Shipp, T. (1975), Vertical laryngeal position during continuous and discrete vocal frequency change : *J. Speech Hear. Res.*, 18:707–718.

Shipp, T. (1977), Vertical laryngeal position in singing : *J. Res. Singing*, 1:16–24.

Shipp, T. (1987), Vertical laryngeal position: Research findings and application for singers : *J. Voice*, 1(3):217–219.

Shipp, T. et Izdebski, K. (1975), Vocal frequency and vertical larynx positioning by singers and nonsingers : *J. Acous. Soc. Am.*, 58(5):1104–1106.

Sihvo, M. et Sala, E. (1996), Sound level variation findings for pianissimo and fortissimo phonations in repeated measurements : *J. Voice*, 10(3):262–268.

Smith, J. , Henrich, N. et Wolfe, J. (2007), Resonance tuning in singing : *In 19th International Congress on Acoustics, Madrid, Espagne*.

Sonninen, A. , Hurme, P. et Laukkanen, A.-M. (1999), The external frame function in the control of pitch, register, and singing mode: Radiographic observations of a female singer : *J. Voice*, 13(3):319–340.

Steinecke, I. et Herzel, H. (1995), Bifurcations in an asymmetric vocal-fold model : *J. Acous. Soc. Am.*, 97(3):1874–1884.

Stone, R. E. , Cleveland, T. F. , Sundberg, J. et Prokop, J. (2003), Aerodynamic and acoustical measures of speech, operatic, and broadway vocal styles in a professional female singer : *J. Voice*, 17(3):283–297.

Stone, R. E. et Krause Ferch, P. A. (1982), Intra-subject variability in F0 - SPLmin voice profiles : *J. Speech Hear. Res.*, 47:134–137.

Story, B. H. (1995), *Physiologically-based speech simulation using an enhanced wave-reflection model of the vocal tract* : Thèse de doctorat, Université d'Iowa.

Story, B. H. (2004), Vowel acoustics for speaking and singing : *Acta Acoustica*, 90(4):629–640.

Story, B. H. , Titze, I. R. et Hoffman, E. A. (1996), Vocal tract area functions from magnetic resonance imaging : *J. Acous. Soc. Am.*, 100(1):537–554.

Story, B. H. , Titze, I. R. et Hoffman, E. A. (2001), The relationship of vocal tract shape to three voice qualities : *J. Acous. Soc. Am.*, 109(4):1651–1667.

Stout, B. (1938), The harmonic structure of vowels in singing in relation to pitch and intensity : *J. Acous. Soc. Am.*, 10:137–146.

Sulter, A. M. , Schutte, H. K. et Miller, D. G. (1995), Differences in phonetogram features between male and female subjects with and without vocal training : *J. Voice*, 9(4):363–377.

Sulter, A. M. , Wit, H. P. , Schutte, H. K. et Miller, D. G. (1994), A structured approach to Voice Range Profile (phonetogram) analysis : *J. Speech Hear. Res.*, 37:1076–1085.

Sundberg, J. et Nordström, P.-E. (1976), Raised and lowered larynx - the effect on vowel formant frequencies : *STL-QPSR*, 17:35–39.

Sundberg, J. (1970), Formant structure and articulation of spoken and sung vowels : *Folia Phoniat.*, 22:28–48.

Sundberg, J. (1974), Articulatory interpretation of the "singing formant" : *J. Acous. Soc. Am.*, 55(4):838–844.

Sundberg, J. (1975), Formant technique in a professional female singer : *Acustica*, 32(2):89–96.

Sundberg, J. (1987), *The Science of the Singing Voice* : Northen Illinois University Press, Dekalb, Illinois.

Sundberg, J. (1995), The singer's formant revisited : *STL-QPSR*, 36:83–96.

Sundberg, J. (2001), Level and center frequency of the singer's formant : *J. Voice*, 15(2):176–186.

Sundberg, J. (2003), Research on the singing voice in retrospect : *STL-QPSR*, 45(1):11–22.

Sundberg, J. , Andersson, M. et Hultqvist, C. (1999), Effects of subglottal pressure variation on professional baritone singers' voice sources : *J. Acous. Soc. Am.*, 105(3):1965–1971.

Sundberg, J. et Högset, C. (2001), Voice source differences between falsetto and modal registers in counter tenors, tenors and baritones : *Log. Phon. Vocol.*, 26:26–36.

Sundberg, J. et Skoog, J. (1997), Dependence of jaw opening on pitch and vowel in singers : *J. Voice*, 11(3):301–306.

Sundberg, J. , Titze, I. R. et Scherer, R. (1993), Phonatory control in male singing : a study of the effects of the subglottal pressure, fundamental frequency, and mode of phonation on the voice source : *J. Voice*, 7(1):15–29.

Svec, J. et Pesak, J. (1994), Vocal breaks from the modal to falsetto register : *Folia Phoniatr. Logop.*, 46:97–103.

Svec, J. G. , Schutte, H. K. et Miller, D. G. (1999), On pitch jumps between chest and falsetto registers in voice: Data from living and excised human larynges : *J. Acous. Soc. Am.*, 106(3):1523–1531.

Tarneaud, J. (1961), *Traité pratique de phonologie et de phoniatrie* : Maloine. Paris.

Ternström, S. O. (2008), Hi-Fi voice: observations on the distribution of energy in the singing voice spectrum above 5 kHz : *in Acoustics'08, in J. Acous. Soc. Am.*, 123(5):3379.

Ternström, S. O. , Bohman, M. et Södersten, M. (2006), Loud speech over noise: Some spectral attributes, with gender differences : *J. Acous. Soc. Am.*, 119(3):1648–1665.

Titze, I. R. (1973), The human vocal cords: A mathematical model. part I : *Phonetica*, 28:129–170.

Titze, I. R. (1988), The physics of small-amplitude oscillation of the vocal folds : *J. Acous. Soc. Am.*, 83(4):1536–1552.

Titze, I. R. (1992), Acoustic interpretation of the Voice Range Profile (Phonetogram) : *J. Speech Hear. Res.*, 35(1):21–34.

Titze, I. R. (1994), *Principles of Voice Production* : Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

Titze, I. R. (2004), Theory of glottal airflow and source-filter interaction in speaking and singing : *Acta Acoustica*, 90(4):641–648.

Titze, I. R. (2008), Nonlinear source-filter coupling in phonation: Theory : *J. Acous. Soc. Am.*, 123(5):2733–2749.

Titze, I. R. , Baken, R. et Herzel, H. (1993), *Vocal Fold Physiology*, chap. Evidence of chaos in Vocal Fold Vibration, p. 143–188 : Singular Publishing Group, Inc, San Diego, California.

Titze, I. R. , Riede, T. et Popolo, P. (2008), Nonlinear source-filter coupling in phonation: Vocal exercises : *J. Acous. Soc. Am.*, 123(5):1902–1915.

Titze, I. R. et Story, B. H. (1997), Acoustic interactions of the voice source with the lower vocal tract : *J. Acous. Soc. Am.*, 101(4):2234–2243.

Tom, K. et Titze, I. R. (2001), Vocal intensity in falsetto phonation of a countertenor: An analysis by synthesis approach : *J. Acous. Soc. Am.*, 110(3):1667–1676.

Tosi, P. (1723)a, *L'art du chant* : Bologne. Traduit de l'italien par T. Lemaire (1874).

Tosi, P. (1723)b, *Opinioni de' Cantori antichi e moderni* : Arnaldo Forni Editore. Édité par Luigi Leonesi en 1904.

Vennard, W. (1967), *Singing: the mechanism and the technic* : Carl Fisher Inc., New York.

Vilkman, E. et Alku, P. (1993), Register shift in the lower pitch range : *In Proceedings on the Stockholm Music Acoustic Conference, 28th July - 1st August*.

Vilkman, E. , Alku, P. et Laukkanen, A.-M. (1995), Vocal-fold collision mass as a differentiator between registers in the low-pitch range : *J. Voice*, 9(1):66–73.

Vilkman, E. , Sonninen, A. , Hurme, P. et Körkkö, P. (1996), External laryngeal frame function in voice production revisited: A review : *J. Voice*, 10(1):78–92.

Watts, C. , Barnes-Burroughs, K. , Estis, J. et Blanton, D. (2006), The singing power ratio as an objective measure of singing voice quality in untrained talented and nontalented singers : *J. Voice*, 20(1):82–88.

Weiss, R. , Brown Jr, W. et Morris, J. (2001), Singer's formant in sopranos: Fact or fiction? : *J. Voice*, 15(4):457–468.

Winckel, F. (1971), How to measure the effectiveness of stage singers voices : *Folia Phoniat.*, 23(4):228–233.

Winckel, F. (1973), Comment mesurer l'efficacité de la voix chantée professionnelle : *Bulletin du Groupe d'Acoustique Musicale*, 67.

Wolf, S. K. et Sette, W. J. (1935), Some applications of modern acoustic apparatus : *J. Acous. Soc. Am.*, 6(3):160–168.

Wolf, S. K. , Stanley, D. et Sette, W. (1935), Quantitative studies on the singing voice : *J. Acous. Soc. Am.*, 6(3):255–266.

Zemp, H. , Leothaud, G. et Lortat-Jacob, B. (1996) : Les voix du monde, une anthologie des expressions vocales. 3 CDs, Ed. Le chant du monde.

## Résumé

Cette thèse porte sur l'influence de la voyelle sur les mécanismes laryngés (M1 et M2) en voix chantée. Nous avons observé que les chanteurs associent le /a/ à M1 et le /i/ à M2. Nous avons alors cherché des corrélats physiologiques et acoustiques en étudiant l'influence des voyelles sur les limites phonétographiques, sur plusieurs paramètres de source et spectraux ainsi que sur les transitions des mécanismes.

La limite supérieure des phonétogrammes est de 10 dB plus intense pour /a/ que pour /i/ en M1, mais pas en M2. Le phonétogramme de M2 est donc décalé, par rapport à celui de M1, vers les faibles niveaux pour /a/ mais pas pour /i/. Ce décalage est dû en partie à la différence de valeurs de quotient ouvert entre M1 et M2. De plus, l'amplitude du signal électroglottographique augmente avec l'intensité et est plus grande pour /i/ que pour /a/, révélant des différences glottiques de production de voyelles à mêmes hauteur et intensité. Les liens entre les voyelles et la position verticale du larynx dépendent de l'expertise vocale des chanteurs.

L'étude de la répartition de l'énergie spectrale est effectuée en calculant le rapport de l'énergie (ER) de la bande du formant du chanteur (FB2) ou des hautes fréquences (FB3) à l'énergie totale. Il est possible d'obtenir un formant du chanteur aussi intense en M2 qu'en M1. ER(FB2) peut saturer à haut niveau, en fonction de la voyelle, du mécanisme et de l'expertise vocale. ER(FB3) est plus faible en M2 qu'en M1.

L'intervalle fréquentiel des sauts M1→M2 augmente avec l'intensité mais pas avec la hauteur. Ceci n'est pas observé dans le sens M2→M1. La fréquence de déclenchement de la transition est plus basse pour /i/ que pour /a/.



**Mots clés :** voix chantée, mécanisme laryngé, registre, voyelle, phonétogramme, source glottique, formant du chanteur, saut de fréquence.



## Abstract

This dissertation concerns the influence of the vowel on the laryngeal mechanisms (M1 and M2) in singing voice. We observed that singers associate /a/ with M1 and /i/ with M2. We then searched for physiological and acoustical correlates by studying the influence of vowels on the Voice Range Profile (VRP) on different glottal and spectral parameters as well as the mechanisms' transitions.

The upper VRP limit is 10 dB louder for /a/ than for /i/ in M1, but not in M2. The M2 VRP is therefore at a lower level when compared to the M1 VRP for /a/, but not for /i/. This shift is partly explained by different open quotient values for M1 and M2. In addition, the amplitude of the electroglottographic signal increases with intensity and is larger for /i/ than for /a/, revealing glottal differences in the production of vowels at the same pitch and intensity. The influence of the vowel on the vertical larynx position depends on the vocal expertise of the singers.

The spectral study is done by calculating the ratio (ER) between either the energy of the frequency band where the singer's formant is located (FB2) or of the band corresponding to high frequencies (FB3) and the total energy. The energy of the singer's formant can be as high in M2 as in M1. ER(FB2) can reach a saturation level depending on the vowel, the laryngeal mechanism, the vocal expertise. ER(FB3) is lower in M2 than in M1.

The frequency jump that occurs in M1→M2 transitions increases with level, but not with pitch. These correlations were not observed for M2→M1 transitions. The starting frequency of the jumps is lower for /i/ than for /a/.



**Key words:** singing voice, laryngeal mechanism, register, vowel, Voice Range Profile, glottal source, singer's formant, frequency jump.